

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ELETROEROSÃO POR FIO EM METAL DURO PARA FERRAMENTAS DE
ESTAMPAGEM DE LÂMINAS DE MOTORES ELÉTRICOS**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

HEBER DE CARVALHO HESPANHOL

Florianópolis, janeiro de 2009.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

ELETROEROSÃO POR FIO EM METAL DURO PARA FERRAMENTAS DE
ESTAMPAGEM DE LÂMINAS DE MOTORES ELÉTRICOS

HEBER DE CARVALHO HESPANHOL

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
Orientador

Prof. Dr. Eng. Fred Lacerda Amorim
Co-orientador

Prof. D. Sc Eduardo Alberto Fancello
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng.
Presidente

Prof. Carlos Augusto Silva de Oliveira, D. Sc

Prof. Aloísio Nelmo Klein, Dr. -Ing.

Dedico este trabalho aos meus pais, maiores educadores da minha vida. Minha mãe, Anivalda de Carvalho Hespanhol, professora que sempre incentivou o estudo dos filhos. Meu pai, Saulo Hespanhol, por patrocinar, incentivar e acreditar no seu filho. A Rafaela Gazzana de Almeida Hespanhol, amor da minha vida, que ficou ao meu lado e me ajudou em momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos ao Prof. Dr.Ing. Walter L. Weingaertner e ao Prof. Dr.Eng. Fred. L. Amorim, orientadores, pelos conhecimentos transmitidos, apoio moral e contribuição irrestrita para realização deste trabalho.

Meus profundos agradecimentos a empresa e aos Líderes e Especialistas da Whirlpool – Unidade de Compressores - Embraco, por viabilizarem os recursos, acreditarem no meu trabalho, pela concessão das horas de estudos e direcionamento intelectual.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, pela excelente receptividade oferecimento de um aprendizado de alto nível.

Agradeço ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - POSMEC pela ótima estrutura, organização, importantes aulas realizadas e disponibilidade de horários flexíveis para as pessoas de outras cidades e àquelas que trabalham nas indústrias da região.

Em fim, agradeço a todos que de forma direta e indireta contribuíram para concretização desta dissertação de mestrado e a Deus, por ter me dado saúde e intelecto para realizar este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	IX
SIMBOLOGIA	X
RESUMO.....	XI
ABSTRACT.....	XII
1. INTRODUÇÃO	13
2. PROCESSO DE ESTAMPAGEM DE LÂMINAS DE MOTORES ELÉTRICOS.....	17
2.1 Introdução	17
2.2 Concepção de uma ferramenta de estampagem de aço elétrico	19
2.2.1 Propriedades dos metais duros usados para fabricação de ferramentas de estampagem.	25
3. FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE USINAGEM POR ELETROEROSÃO ..	32
3.1 Introdução	32
3.2 Conceitos da eletroerosão por descargas elétricas.....	33
3.3 Generalidades do processo de eletroerosão	34
3.4 A eletroerosão por fio - WEDM.....	37
3.5 Tipos de máquina de WEDM.....	39
3.5.1 Funcionamento da WEDM	40
3.5.2 Conceitos sobre o fio da WEDM.....	42
3.6 Princípio físico de uma descarga elétrica	45
3.7 Processo WEDM para metal duro	50
4. MÉTODOS EXPERIMENTAIS E MATERIAIS.....	55
4.1 Plano e geometria de amostragem	57
4.2 Preparação das amostras	58
4.3 A máquina de eletroerosão por fio e seus parâmetros	60

4.4	Os parâmetros do dielétrico	61
4.5	Classes de metais duros usados para estampagem de lâminas elétricas	62
4.6	O fio eletrodo	64
4.7	Variação dos parâmetros do gerador	66
4.7.1	Avaliação entre os “passes” de usinagem - análise entre regimes de desbaste e acabamentos	66
4.7.2	Variação dos regimes de usinagem no acabamento.....	68
5.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	69
5.1	A tabela de tecnologia e seus parâmetros	69
5.2	Condições do dielétrico usado no processo WEDM em metal duro.....	71
5.3	Avaliação da integridade da superfície usinada para diferentes classes de metais duros.....	77
5.4	Análise da exatidão geométrica, taxa de corte e qualidade da superfície usinada entre fios de latão extra-duro	85
5.5	Modificação dos parâmetros de descarga elétrica do gerador da máquina	92
5.5.1	Estudo entre os regimes de usinagem - avaliação do estado atual.....	92
5.5.2	Variação na quantidade de regimes de usinagem.....	103
6.	CONCLUSÃO	109
7.	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	112
	REFERÊNCIAS.....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Setor de estampagem de motores e geradores elétricos. (Malvestiti - 2007).	18
Figura 2.2 – Exemplo de estatores e rotores para motores elétricos. (Corrada - 2007).	18
Figura 2.3 – Exemplo de estatores para transformadores. (Corrada - 2007).	19
Figura 2.4 – Leiaute para produção do rotor e estator em ferramenta progressiva. (Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT - 1997).	19
Figura 2.5 – Ferramenta de estampagem usada para fabricação do rotor e estator, parte inferior. (Cortesia: Ferramentaria Whirlpool – Unidade Embraco).....	21
Figura 2.6 – Ferramenta de estampagem usada para fabricação do rotor e estator, parte superior. (Cortesia: Ferramentaria Whirlpool – Unidade Embraco).....	21
Figura 2.7 – Representação das “zonas” na estampagem de peças. (Greskovic et al - 2002).	23
Figura 2.8 – Característica do processo de crescimento de rebarba para estampagem do aço elétrico E170 (%1,6 Si) com punção de aço DIN 19.573 e matriz de aço DIN 19.581 ambos com 62 HRC de dureza, segundo (Greskovic et al - 2002).	24
Figura 2.9 – Microestrutura de um metal duro tipo TSM 30 -10%Co+90%WC, tamanho de grão de WC de 0,7 μm . (Ceratizit - 1500x).	28
Figura 2.10 – Microestrutura de um metal duro tipo H40S - 12%Co+88%WC, tamanho de grão de WC de 1,5 a 2,0 μm . (Ceratizit - 1500x).	28
Figura 2.11 – Microestrutura de um metal duro tipo B40S - 12%Co+88%WC, tamanho de grão de WC de 3,0 a 5,0 μm . (Ceratizit - 1500x).	28
Figura 2.12 – Dureza (HRA) do metal duro (WC-Co) com diferentes tamanhos de grãos em função de diferentes percentuais de Co. (Lenel - 1980).....	29
Figura 2.13 – Resistência à corrosão em função do pH para diferentes ligas de metal duro com variação do percentual de Co. (Sandvik - 2007).	30
Fig. 3.1(a) Esquema representativo da erosão. (b) Esquema representativo da eletrólise. (Sommer et al - 1994).	33
Fig. 3.2 – Esquema representativo do circuito Lazarenko. (König e Klocke -1997). .	34
Fig. 3.3 (a) Esquema representativo da eletroerosão por penetração. (b) Esquema representativo da eletroerosão por fio - WEDM. (ENGEMAQ -1986).....	35

Fig. 3.4 – Principais variações da eletroerosão por penetração e por fio ou WEDM. (Klocke e Nöthe - 1997).	36
Figura 3.5 - Panorama de utilização da WEDM. (Charmilles – 2002).	37
Figura 3.6 – Representação de máquina para WEDM. (Sommer et al - 1994).	38
Figura 3.7. (a) Exemplo de matrizes fabricadas pelo processo de WEDM. (Agie - 2007). (b) Exemplo de peças decorativas fabricadas pelo processo de WEDM. (Brasimet -2002).....	40
Figura 3.8 – Esquema representativo do sistema de movimentação do fio e fluxo do dielétrico no processo de WEDM. (Sommer et al -1992).	41
Figura 3.9 – Etapas da formação de uma descarga elétrica “faísca”. Parâmetros conforme norma VDI 3402. (König - 1997).....	46
Figura 3.10 – Detalhe das danificações causadas pela eletroerosão. Corte em regime de desbaste. Metal duro com 85%WC -15%Co. Condutividade do dielétrico igual a 10 μ S/cm. (Chang et al – 2003).	48
Figura 3.11 – Detalhe das danificações causadas pela eletroerosão. Material: Aço micro ligado. Energia de descarga W_e igual a 220 W, duração da descarga t_e igual a 800 μ s, eletrodo de Cu. (Chang et al – 2003).	48
Figura 3.12 – Superfície refundida com os tipos de alterações e suas descrições. Material: Liga Hastelloy. 300X (MDC - 1980)	49
Figura 3.13 – Representação esquemática do campo de tensão elétrica entre fio e peça. Reação eletroquímica com arraste da fase metálica do metal duro. (Maggi et al - 1991).....	52
Fig. 3.14(a) Detalhe da danificação causada pelo dielétrico da eletroerosão em região não eletroerosionada. (b) Danificações causadas pelo dielétrico da eletroerosão em região eletroerosionada. Lämmle (1997).	53
Figura 4.1 – Representação esquemática dos principais fatores de influência na estampagem de lâminas para motores elétricos.	55
Figura 4.2 – Representação esquemática dos fatores de influência na fabricação de punções e matrizes de metal duro para ferramentas de estampagem de lâminas de motores elétricos.	56
Figura 4.3 – Geometria das amostras.	58
Figura 4.4 – Esquema de cortes realizados na preparação das amostras.....	58
Figura 4.5 – Esquema das superfícies analisadas nas amostras.....	59
Figura 4.6 – Esquema representativo das etapas de usinagem dadas pela tabela de tecnologia.	67

Figura 5.1 – Metalografia do topo de amostra submersa por 70 horas em água potável. Metal duro (88%WC+12%Co+Cr e Re).	72
Figura 5.2 – Metalografia do topo da amostra usinada submersa durante 20 horas em água potável e controle do dielétrico.	73
Figura 5.3 – Metalografia da lateral usinada da amostra submersa durante 20 horas em água potável.	73
Figura 5.4 – Metalografia do topo de amostra usinada com controle de pH, condutividade e uso de água destilada como dielétrico. Amostra 1 - Metal duro (88%WC+12%Co+Cr+Re).	76
Figura 5.5 – Metalografia da lateral usinada da amostra 1. Metal duro (88%WC+12%Co com adição de Cr e Re).	76
Figura 5.6 – Metalografia do topo da amostra 2. Metal duro (85%WC+15%Co).....	78
Figura 5.7 – Metalografia da lateral da amostra 2. Metal duro (85%WC+15%Co)....	79
Figura 5.8 – Metalografia do topo da amostra 3. Metal duro (88%WC+12%Co).....	80
Figura 5.9 – Metalografia da lateral usinada da amostra 3. Metal duro (88%WC+12%Co).....	80
Figura 5.10 – Metalografia do topo da amostra 4. Metal duro (84%WC+16%Ni).....	81
Figura 5.11 – Metalografia da lateral usinada da amostra 4. Metal duro (84%WC+16%Ni).	82
Figura 5.12 – Microestrutura da amostra 4. Metal duro com 84%WC+16%Ni. (a) Detalhe de uma região com distribuição normal de WC+Ni. (b) e (c) Concentrações de Ni encontradas.	83
Figura 5.13 – Metalografia do topo da amostra 5. Metal duro (88,5%WC+11%Co+0,5%Ni).	84
Figura 5.14 – Metalografia da lateral da amostra 5 - Metal duro (88,5%WC+11%Co+0,5%Ni).	84
Figura 5.15 – Micrografia da superfície livre do fio F1.....	87
Figura 5.16 – Micrografia da superfície livre do fio F2.....	88
Figura 5.17 – Metalografia do topo da amostra de metal duro para o tipo de fio F2.	89
Figura 5.18 – Metalografia da lateral da amostra usinada para o tipo de fio F2.....	89
Figura 5.19 – Metalografia da lateral da amostra usinada após regime de desbaste. Detalhe de camada danificada.	95
Figura 5.20 – Metalografia da lateral da amostra usinada após o regime de desbaste. Detalhe das microtrincas e danificações encontradas.	95

Figura 5.21 – Metalografia da lateral da amostra usinada após um desbaste e um acabamento. Detalhe da microtrinca encontrada.	97
Figura 5.22 – Metalografia da lateral da amostra usinada após um desbaste e dois acabamentos. Detalhe das microtrincas encontradas.	97
Figura 5.23 – Metalografia da lateral da amostra usinada após um desbaste e dois acabamentos. Detalhe da dissolução do ligante de Co encontrada.	98
Figura 5.24 – Metalografia da lateral da amostra usinada após um desbaste e três acabamentos. Detalhe das danificações encontradas.	99
Figura 5.25 – Metalografia da lateral da amostra usinada após um desbaste e quatro acabamentos. Detalhe das danificações encontradas.	100
Figura 5.26 – Metalografia da lateral da amostra usinada após um desbaste e cinco acabamentos. Detalhe das danificações encontradas.	101
Figura 5.27 – Metalografia do topo da amostra usinada após um desbaste e cinco acabamentos. Detalhe das danificações encontradas com profundidade de 11 μ m.	106
Figura 5.28 – Metalografia da lateral da amostra usinada após um desbaste e cinco acabamentos. Detalhe das danificações encontradas.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Influência da variação do percentual de silício do aço elétrico na produtividade da ferramenta. (Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT - 1997).	25
Tabela 2.2 – Propriedades representativas dos carbeto de tungstênio.....	27
Tabela 3.1 – Classes e suas respectivas propriedades mecânicas dos principais tipos de fios. (Sommer et al - 1994).	44
Tabela 4.1 - Resumo dos experimentos realizados relacionados com os fatores de influência.	56
Tabela 4.2 – Parâmetros de entrada do processo.	61
Tabela 4.3 – Principais propriedades dos metais duros avaliados.....	63
Tabela 4.4 – Composição dos fios avaliados.	64
Tabela 4.5 – Amostragem em função dos regimes de usinagem.....	66
Tabela 5.1 – Parâmetros fornecidos pela tabela de tecnologia. (Agie - 2003).	69
Tabela 5.2 – Tempo de usinagem das amostras em desbaste e acabamento para cada fio testado.	86
Tabela 5.3 – Taxa de corte V_w das amostras para cada fio testado.....	87
Tabela 5.4 – Resultados de exatidão geométrica nos três pontos do perfil das amostras.....	90
Tabela 5.5 – Valores de rugosidade R_a da superfície usinada.	91
Tabela 5.6 – Parâmetros de usinagem fornecidos pela tabela de tecnologia recomendada (padrão), conforme código ehmcca25nnn025b015070. (Agie - 2004).	93
Tabela 5.7 – Sobremetal e danificações encontradas nos regimes desbaste e acabamentos.....	102
Tabela 5.8 – Tempos de usinagem para em cada etapa. Comparação de resultados entre a tabela padrão e alterada com a diminuição da 6ª etapa.	104
Tabela 5.9 – Taxa de corte V_w das amostras em cada etapa. Comparação de resultados entre a tabela padrão e alterada com a diminuição da 6ª etapa.....	104
Tabela 5.10 – Valores de exatidão geométrica nos três pontos do perfil das amostras.....	105
Tabela 5.11 – Valores de rugosidade R_a da superfície usinada para condições normal e alterada	105

SIMBOLOGIA

Alfabeto Latino:

f	[Hz]	Frequência de descarga
h	[mm]	Altura da peça usinada
i_e	[A]	Corrente média de descarga
\hat{i}_e	[A]	Corrente máxima de descarga
ofs	[mm]	Distância da geometria programa até o centro do fio
P	[mm]	Perímetro
r	[mm]	Raio
R_a	[μm]	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos picos do perfil de rugosidade em relação à linha média
S_m	[mm]	Exatidão geométrica média do perfil da peça usinada
t_d	[μs]	Tempo de retardo da descarga
t_e	[μs]	Tempo ou duração de descarga
t_o	[μs]	Tempo de intervalo de descarga
\hat{u}_i	[V]	Tensão máxima ou tensão em aberto de descarga
\hat{u}_e	[V]	Tensão média de descarga
v	[mm/min]	Velocidade de avanço do fio
V_w	[mm ² /min]	Taxa de corte
W_e	[J]	Energia de descarga

RESUMO

O processo de eletroerosão por fio é utilizado atualmente na fabricação da maioria das matrizes e punções de metal duro (carbeto de tungstênio), usados em ferramentas de estampagem de aços para motores elétricos. As indústrias de eletrodomésticos, motores elétricos industriais, transformadores e compressores herméticos, utilizam ferramentas progressivas de estampagem, justificando um melhor conhecimento do processo de fabricação por eletroerosão por fio (Wire Electrical Discharge Machining - WEDM). O emprego de condições de trabalho não adequadas introduz defeitos na camada limite dos punções e matrizes que resultam numa diminuição drástica da vida destes componentes. Na presente dissertação, foi realizado um estudo para o aprimoramento do processo de usinagem do metal duro por WEDM, com foco na diminuição das danificações causadas na superfície usinada para aumentar a vida de matrizes e punções, como também aumentar o rendimento do processo de fabricação destes elementos de corte. Para isto, foi realizada uma análise das variáveis de entrada e sua influência sobre as características e sobre o resultado de trabalho. A característica de processo verificada foi limitada à taxa de corte (por limitações técnicas no equipamento). O resultado de trabalho foi avaliado pela exatidão geométrica dos componentes produzidos, pela forma e extensão das microtrincas, pela extensão da zona termicamente afetada e pelas características verticais da rugosidade. A partir dos resultados obtidos foi possível recomendar condições mais favoráveis de trabalho, resultando tanto em uma vida mais longa das matrizes e punções como também numa minimização dos custos de produção destes elementos de corte de metal duro.

ABSTRACT

The process of wire electrical discharge machining is currently used in manufacturing most hard metal (tungsten carbide) dies and punches, used in steel stamping tools for electric motors. The home appliance, industrial electric motor, transformer and hermetic compressor industries, use progressive stamping tools, justifying a better understanding of the manufacturing process by Wire Electrical Discharge Machining – WEDM. An unsuitable working condition introduces defects in the layer limits of punches and dies that result in a drastic reduction in the life of these components. In this dissertation, a study was conducted to improve the machining process of hard metal by WEDM, with a focus on reducing the damages produced on the machined surface to increase the life of the dies and punches, and to also increase the productivity of the manufacturing process of these cutting elements. For this, an analysis was carried out of the input variables and their influence on the characteristics and the result of the work. The characteristic of the verified process was limited to the cutting rate (by the equipment's technical limitations). The result of the work was evaluated by the geometric accuracy of the components produced, by the form and extent of the micro-cracks, by the extent of the zone thermally affected and by the vertical aspects of the roughness. From the results obtained it was possible to recommend more favorable work conditions, resulting in a longer life for the dies and punches as well as production cost minimization of these hard metal cutting items.

Keywords: Stamping, machining, wire electrical discharge machining, hard metal.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Silva et al (2006), a fabricação de motores elétricos e transformadores, especificamente do rotor e estator, é um processo crítico para a indústria. Um bom exemplo é a indústria de compressores herméticos para refrigeração doméstica, que produz em média 280.000 motores por dia. Para suprir esta demanda, as ferramentas de estampagem usam o carbeto de tungstênio WC-Co como material de seus elementos cortantes. Em relação à punções fabricados de aço ferramenta, os punções de metal duro garantem uma vida mais longa por apresentarem uma dureza e resistência de gume mais elevada.

Para fabricação dos punções e matrizes das ferramentas progressivas de estampagem, a usinagem por eletroerosão por fio ou WEDM é hoje o processo mais empregado. Nas ferramentarias das empresas do setor elétrico no Brasil especificamente em Santa Catarina este processo de usinagem é representativo e de grande utilização. Com o domínio crescente da tecnologia de fabricação por WEDM a importação de ferramentas de outros países, como Itália, Alemanha, Japão e USA, que são os principais especialistas e fabricantes destas ferramentas para indústria de motores e transformadores elétricos, está sendo gradativamente diminuída ou até eliminada.

A situação do mercado nacional de fabricação de ferramentas de estampagem para motores elétricos, necessita de um grande impulso no desenvolvimento tecnológico em seus processos de fabricações para ampliação de mercado com base no aumento da qualidade e diminuição de custos, envolvendo diretamente o desenvolvimento de novas técnicas de usinagem do metal duro. Segundo Schuh et al (2007), um exemplo de avanço tecnológico é observado nas ferramentarias da Ásia, em destaque na China. Além de ferramentas com concepção de projeto simples também fabricam ferramentas de estampagem para motores elétricos com elevado conteúdo tecnológico. No Brasil, as empresas do setor metal mecânico, como Whirlpool – Unidade Embraco, WEG, Bosch, Tessin, e fornecedores de serviços de usinagem EDM, como Eletrospark, Usifil, Tecnocut e Ferosão, têm hoje ainda uma forte dependência do mercado externo. Em algumas se observa a importação de insumos, em outras a importação de conjuntos e até de matrizes inteiras para a fabricação de seus componentes. A grande maioria das ferramentarias e estamparias brasileiras não fabricam ferramentas de estampagem

de motores elétricos, devido a seus processos de fabricação possuírem alto grau de exatidão geométrica e dificuldades principalmente em relação a usinagem do metal duro.

O processo de fabricação de transformadores e motores elétricos, principalmente o usado em compressores herméticos, eletrodomésticos e motores elétricos industriais, demanda alta produtividade. Em cada motor o estator e o rotor é composto por um pacote de lâminas estampadas de aço elétrico. Como exemplo, apenas na Whirlpool - Embraco são estampados aproximadamente sete milhões de lâminas de estator e de rotor por dia. O mercado exige muita agilidade, competitividade e sustentabilidade através de baixos custos de fabricação, obrigando que o processo de estampagem seja continuamente aprimorado. Para isso, a tecnologia de fabricação das ferramentas de estampagem deve ser dominada e aprimorada. A otimização das características do metal duro empregado e a otimização dos parâmetros do processo de usinagem da eletroerosão por fio são etapas importantes na busca de um processo competitivo, visando uma melhoria da relação custo benefício entre fabricação e a vida da ferramenta.

Por outro lado, existe atualmente uma constante busca do aumento da eficiência dos motores elétricos. Principalmente no mercado europeu e norte americano, a procura de produtos de baixo consumo de energia elétrica é crescente. Para atingir esta característica, faz-se o uso de aços elétricos de elevados teores de silício. O aumento percentual do silício nas lâminas, agrava o desgaste e aumenta as quebras das ferramentas de estampagem devido à natureza abrasiva deste elemento.

Segundo Lämmle (1995), o uso do metal duro para fabricação de punções e matrizes, é a mais usual solução para diminuição do desgaste do processo de estampagem. O processo de usinagem por eletroerosão, exige cuidados especiais para garantir boa integridade da superfície usinada, um forte fator de influência na vida destes componentes.

As pesquisas relacionadas ao processo de remoção de material por eletroerosão, um processo não tradicional de usinagem, na grande maioria, estão voltadas principalmente para peças de aço, sendo restritas as pesquisas voltadas para usinagem do metal duro. O número de tais pesquisas também é menor se comparadas às pesquisas de processos de usinagem tradicionais, como exemplo o fresamento, torneamento e retificação.

O presente trabalho foi desenvolvido na ferramentaria da indústria de compressores herméticos para refrigeração – Whirlpool – Unidade Embraco, localizada em Joinville – Santa Catarina, com a orientação de professores da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis e da Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUC PR, Curitiba. Esta pesquisa foi motivada pela necessidade de melhorias na vida dos punções e matrizes de metal duro que estampam as lâminas dos estatores e rotores de motores elétricos, tendo início em 2004.

Na presente dissertação foi realizado um estudo para o aprimoramento do processo de WEDM em metal duro, com foco na diminuição das danificações causadas na superfície usinada para aumentar a vida de matrizes e punções, como também aumentar o rendimento do processo de fabricação destes elementos de corte. Para isto, foi realizada uma análise das variáveis de entrada e sua influência sobre as características e sobre o resultado de trabalho.

O resultado de trabalho foi avaliado pela exatidão geométrica dos componentes produzidos, pela forma e extensão das microtrincas, pela extensão da zona termicamente afetada e pelas características verticais da rugosidade. A partir dos resultados obtidos foi possível recomendar condições mais favoráveis de trabalho, resultando tanto em uma vida mais longa das matrizes e punções como também numa minimização dos custos de produção destes elementos de corte de metal duro.

Esta dissertação contribui tanto para a empresa citada em questão, bem como para as indústrias usuárias desta tecnologia. A disponibilidade das informações geradas permite o aprimoramento das condições de trabalho da WEDM, e conseqüentemente para o desenvolvimento das ferramentarias, onde Joinville é um dos pólos nacionais, na fabricação de ferramentas de estampagem de motores elétricos para o mercado nacional.

O próximo capítulo apresenta uma explanação geral sobre o processo de estampagem dos aços elétricos para motores. Também explana sobre a classificação do metal duro e suas propriedades.

No capítulo 3 realizou-se uma abordagem do processo de eletroerosão com ênfase dada para WEDM do metal duro. Discutidos pontos de parâmetros do processo como embasamento para o capítulo 4, onde este último se refere à

metodologia dos experimentos com seus respectivos resultados e análise de potencial econômico do processo de eletroerosão por fio do metal duro.

O capítulo 5 apresenta uma discussão dos resultados embasada nas referências pesquisadas sobre o tema da presente dissertação.

2. PROCESSO DE ESTAMPAGEM DE LÂMINAS DE MOTORES ELÉTRICOS

Neste capítulo serão abordados aspectos básicos sobre a estampagem de lâminas para motores elétricos, dando enfoque à ferramenta e ao princípio de estampagem. O mesmo visa dar melhor entendimento sobre a concepção destas ferramentas, como também destacar a necessidade de investigação do processo de WEDM e o papel do engenheiro de processo de fabricação.

2.1 Introdução

Existem diversos tipos de processamento de aços elétricos laminados para motores. Entre os mais usuais na produção em grande escala está o puncionamento e a estampagem progressiva. O puncionamento é utilizado para baixas quantidades de produção e principalmente para motores elétricos de grande porte, sendo menos utilizado que a estampagem progressiva, chamada popularmente entre as empresas, de estampagem rápida ou estampagem de lâminas elétricas. Esta última, utiliza ferramentas de alta vida para o processamento de tais aços elétricos devido ao grande volume de peças produzidas.

O processo de WEDM é usado principalmente devido à complexidade dos componentes de estampagem e a alta dureza do metal duro. Entretanto, este tipo de usinagem tem como princípio a remoção de material por fenômenos térmicos, e conseqüentemente, a integridade da superfície usinada dos punções e matrizes destas ferramentas sofre danificações se os parâmetros da máquina de eletroerosão não são adequados. Estes danos prejudicam o rendimento das ferramentas pelo aumento do desgaste e quebras prematuras, diminuindo assim a sua vida e gerando um impacto negativo para a indústria de motores. Como exemplo a baixa produtividade do setor de estamparia por constantes paradas de prensa para troca da ferramenta, aumento de manutenções destas para substituição ou reafiação das matrizes e punções e perdas de aço elétrico, ou seja, aumento no custo de fabricação final do motor elétrico.

A Fig. 2.1 mostra um setor de estampagem de aço elétrico destacando um conjunto de prensas mecânicas de alta velocidade de estampagem e sistema de alimentação automático do aço bobinado. Em cada prensa é montada uma ferramenta progressiva para fabricação do rotor e estator.

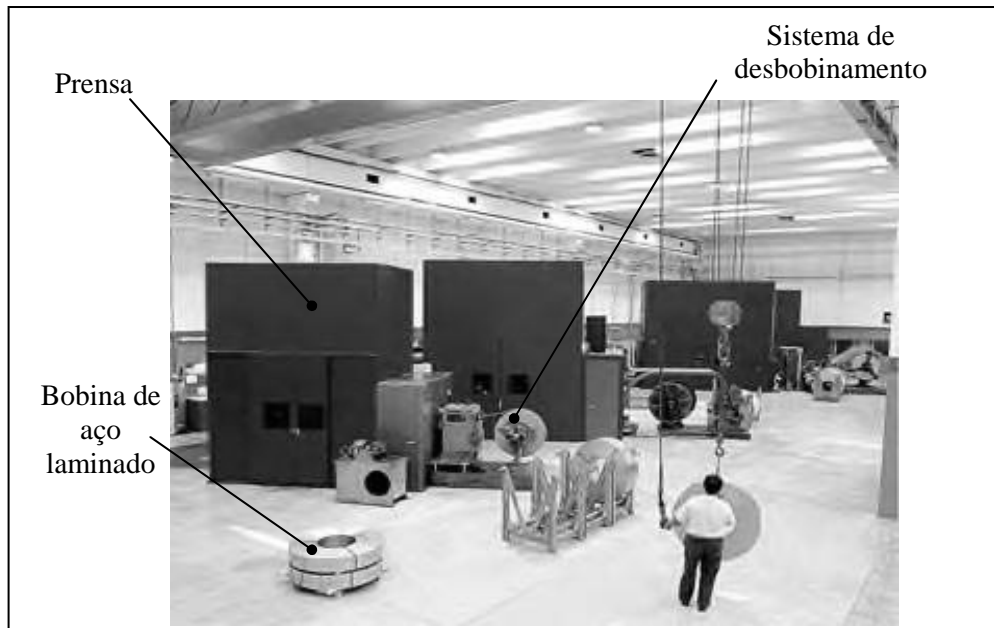


Figura 2.1 – Setor de estampagem de motores e geradores elétricos. (Malvestiti - 2007).

A geometria de circuitos eletromagnéticos tem grande importância no desempenho de máquinas elétricas. A indústria utiliza uma grande variedade de formatos, que são obtidos por corte da “chapa” na operação de estampagem. Como a espessura da chapa é pequena, bilhões de lâminas são estampadas por ano no país.

As Fig. 2.2 e Fig. 2.3 mostram respectivamente os formatos de pacotes de lâminas de rotores e estatores de motores elétricos e de transformadores.



Figura 2.2 – Exemplo de estatores e rotores para motores elétricos. (Corrada - 2007).

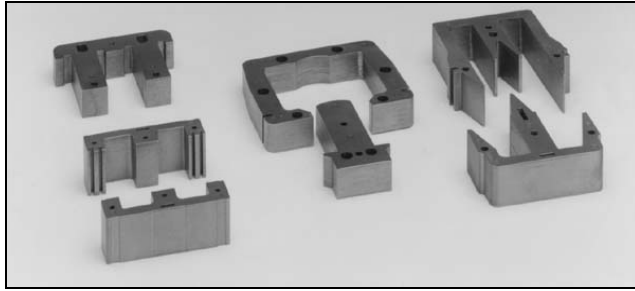


Figura 2.3 – Exemplo de estatores para transformadores. (Corrada - 2007).

2.2 Concepção de uma ferramenta de estampagem de aço elétrico

Na fabricação do rotor e estator a estampagem é realizada progressivamente, ou seja, em estágios. Os cortes de estampagem são chamados de leiaute e variam em quantidade conforme a geometria do rotor e estator, e economia do material. A Fig. 2.4 mostra de forma esquemática um exemplo de leiaute progressivo em oito estágios de estampagem para formação do rotor e estator.

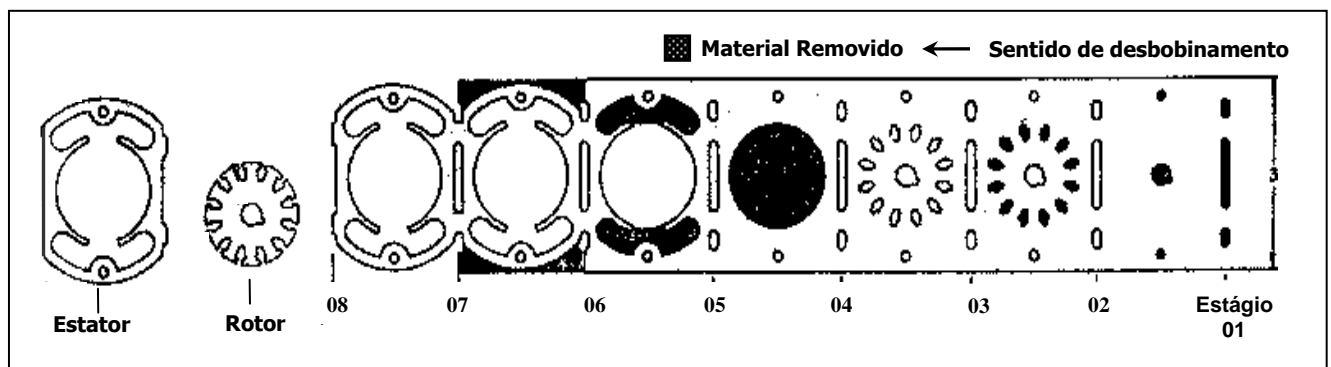


Figura 2.4 – Leiaute para produção do rotor e estator em ferramenta progressiva. (Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT - 1997).

A estampagem do estator e rotor é realizada com ferramentas de alta velocidade de corte, que varia entre 150 a 600 ciclos/min, significando que com uma velocidade de 360 ciclos/min, por exemplo, há uma produção de seis “lâminas” de estator e ou rotor por segundo.

Estas ferramentas foram desenvolvidas em ferramentarias da Europa e Ásia com o advento e desenvolvimento dos materiais cada vez mais resistentes ao desgaste e ao impacto, prensas de alta velocidade, e aprimoramento de controles lógicos de processo - CLP. As ferramentas de estampagem progressiva possuem tolerâncias de fabricação que atingem 2 μm em seus componentes. As dimensões típicas de uma matriz de estampagem progressiva de um motor elétrico de pequeno

porte têm dimensões principais de aproximadamente um metro de comprimento, exigindo cuidados extremos de controle de temperatura e condições de trabalho em todo o ciclo produtivo. Um exemplo típico das elevadas exigências de exatidão geométrica está no punção e na matriz do grampeamento das lâminas do rotor e estator. Este grampeamento permite que as lâminas sejam estampadas e unidas ou “empacotadas” na própria ferramenta, dando o formato final para estes componentes sem a necessidade posterior de empilhamento das mesmas. Dependendo do projeto e qualidade de fabricação da ferramenta, do aço elétrico e do volume de produção desejado, a vida destas ferramentas pode variar de 4 a 5 milhões de ciclos entre reafiações, chegando a uma produção acumulada até seu final de vida ou seu sucateamento, igual a 400 ou até 500 milhões de ciclos. Dependendo do projeto desejado, com ou sem união das lâminas, exatidão de seus componentes e tamanho, as mesmas possuem um custo na ordem de um milhão de Real.

Dentre os maiores fabricantes ou ferramentarias especializadas na construção deste tipo de ferramenta, podem ser citados alguns, são eles:

- Corrada Spa - Itália;
- Malvestiti Spa - Itália;
- Rös and Kuber - Alemanha;
- Mitsuy High Tec - Japão;
- Ferramentaria Whirlpool - Unidade Embraco - Brasil;
- Ferramentaria Weg - Brasil;

Os dois últimos não comercializam as ferramentas e fabricam apenas para uso interno em seu processo produtivo de compressores herméticos e motores elétricos respectivamente.

Devido ao desgaste inerente do processo de estampagem para formação da lâmina elétrica, realizam-se reafiações nas ferramentas. Neste processo, aplica-se a retificação para remoção do desgaste no topo e laterais das matrizes e punções para que estes componentes voltem a ter seus gumes em boas condições de corte. Este ciclo de processo é necessário para diminuição da rebarba nos componentes estampados. A Fig. 2.5 e Fig. 2.6, mostram a concepção de uma ferramenta progressiva, destacando os itens principais:

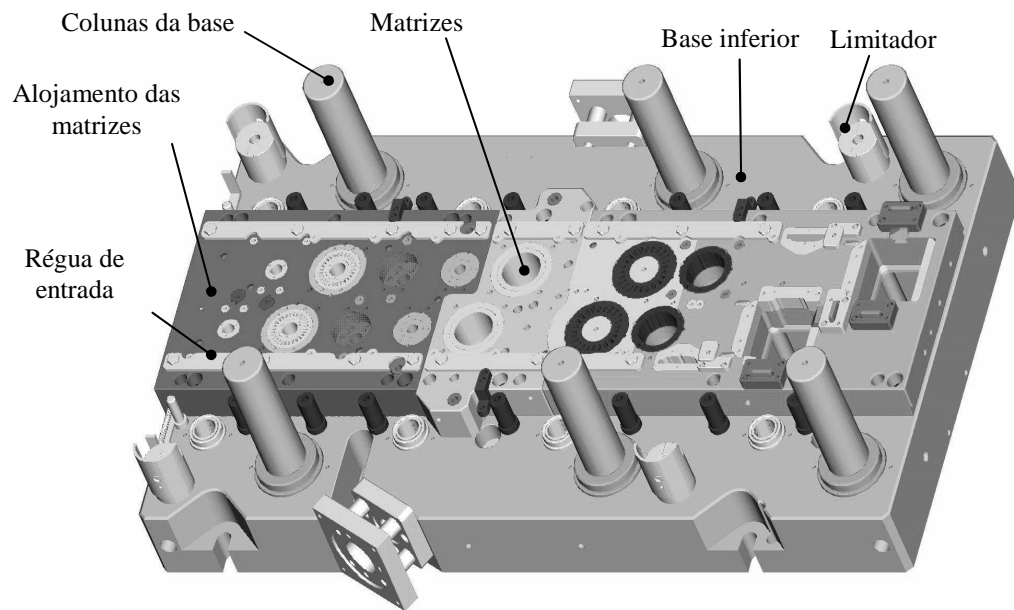


Figura 2.5 – Ferramenta de estampagem usada para fabricação do rotor e estator, parte inferior. (Cortesia: Ferramentaria Whirlpool – Unidade Embraco).

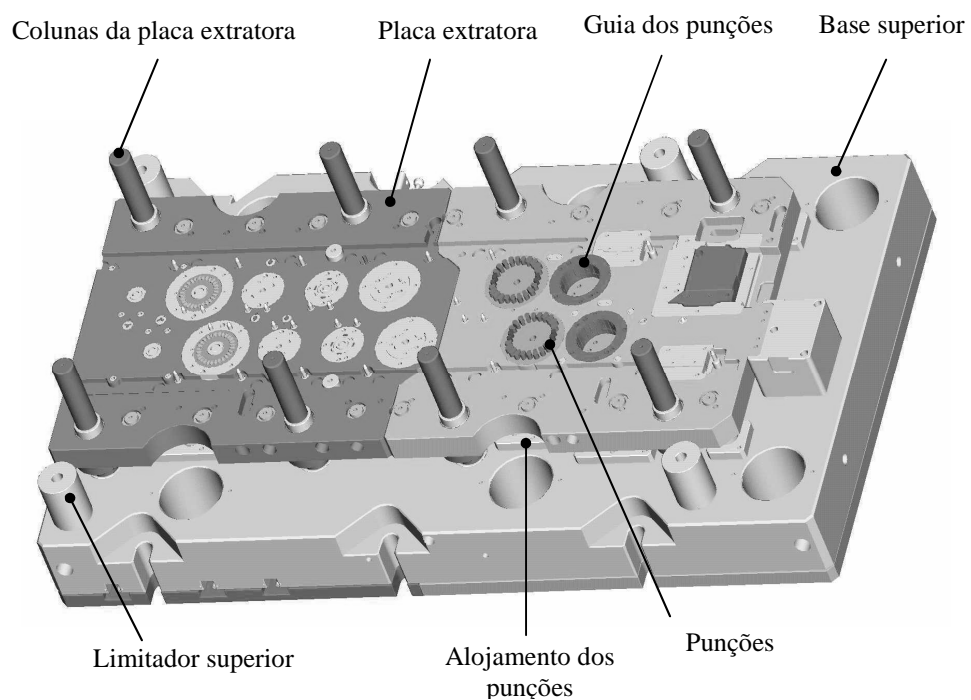


Figura 2.6 – Ferramenta de estampagem usada para fabricação do rotor e estator, parte superior. (Cortesia: Ferramentaria Whirlpool – Unidade Embraco).

A Fig. 2.5 e Fig. 2.6 mostram um típico modelo de ferramenta de estampagem onde basicamente possuem componentes fabricados em aço carbono e aços ferramenta e como descrito, punções e matrizes fabricados a partir do metal duro.

Na estampagem dos aços elétricos, que usualmente possuem espessuras que variam de 0,35 a 0,65 mm, os fenômenos envolvidos exigem que as matrizes e punções estejam em perfeitas condições de corte. Ou seja, afiadas, pois os esforços deste processo solicitam agressivamente tais componentes de estampagem.

O principal problema da estampagem dos aços elétricos é a formação de rebarba no produto estampado. A altura de rebarba interfere na montagem dos “pacotes”, ou seja, no empilhamento das lâminas não devendo ultrapassar um valor pré-estabelecido, sendo usualmente igual a 50 μm . Como relatado, a rebarba admissível, é garantida pela boa condição de corte dos punções e matrizes de metal duro, sendo que a folga total e inicial de corte entre matriz e punção, geralmente utilizadas neste tipo de processo, varia entre 5% a 30% da espessura do aço elétrico. Como exemplo uma chapa usual de motores elétricos, que possui 0,5 mm de espessura, terá folga total de corte entre punção e matriz iniciando em 0,05 mm e por consequência 0,025 mm por lado para o caso de uma folga aplicada de 10%.

Segundo Greskovic et al (2002), o processo de corte é caracterizado por uma grande deformação localizada e seguida de uma fratura dúctil do material. Na prática de engenharia, o formato do produto perto do gume de corte é uma propriedade importante. De forma esquemática a Fig. 2.7, mostra as quatro “zonas” características que podem ser distinguidas no gume de corte. São elas:

- Zona de deformação: Região “arrastada” ou deformada do material pelo punção;
- Zona de cisalhamento: Esta região é formada pelo punção antes da ocorrência da fratura dúctil. Geralmente a superfície desta zona possui baixa rugosidade;
- Zona de fratura ou rompimento: Esta região possui superfície áspera ou com elevada rugosidade, formada pela fratura dúctil do material com o avanço do punção no aço laminado;
- Rebarba: Certa rebarba é formada devido a localização específica do início da fratura.

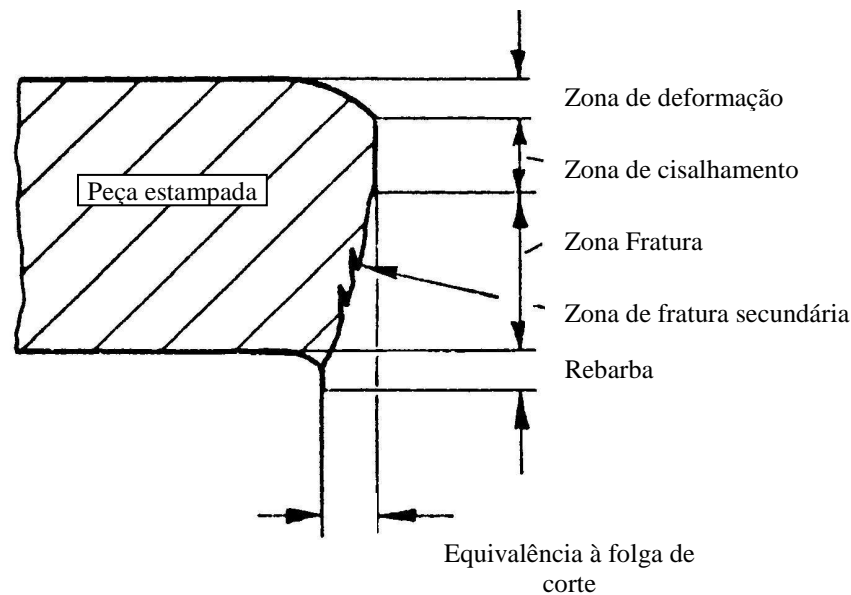


Figura 2.7 – Representação das “zonas” na estampagem de peças. (Greskovic et al - 2002).

Devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça estampada, certo desgaste é inevitável. Isto causa a necessidade de remoção do gume de corte do punção e matriz, ou seja, afiação. O desgaste aumenta com a profundidade da penetração do punção aumentando também a formação de trincas. Com o desgaste da ferramenta as trincas podem não se formarem no gume de corte e sim na superfície livre (topo) ou lateral dos elementos de corte.

O nível de desgaste da ferramenta depende do material de estampagem como também do material do punção e matriz. A altura da rebarba depende da composição e propriedades do aço elétrico, sua espessura, folga de corte e condição da afiação do punção e matriz. A altura da rebarba pode ser tolerada dependendo do uso do componente (peça estampada). No caso da estampagem do rotor e estator, esta influencia no fator de empilhamento das lâminas, ou seja, no espaçamento que pode existir entre elas, o qual influencia nas características magnéticas do motor elétrico.

Na Fig. 2.8 pode-se observar a relação da altura de rebarba em função do número de ciclos de uma ferramenta, onde esta foi medida no sentido longitudinal (SL) e transversal (ST) de laminação do aço elétrico para a fabricação do rotor e estator.

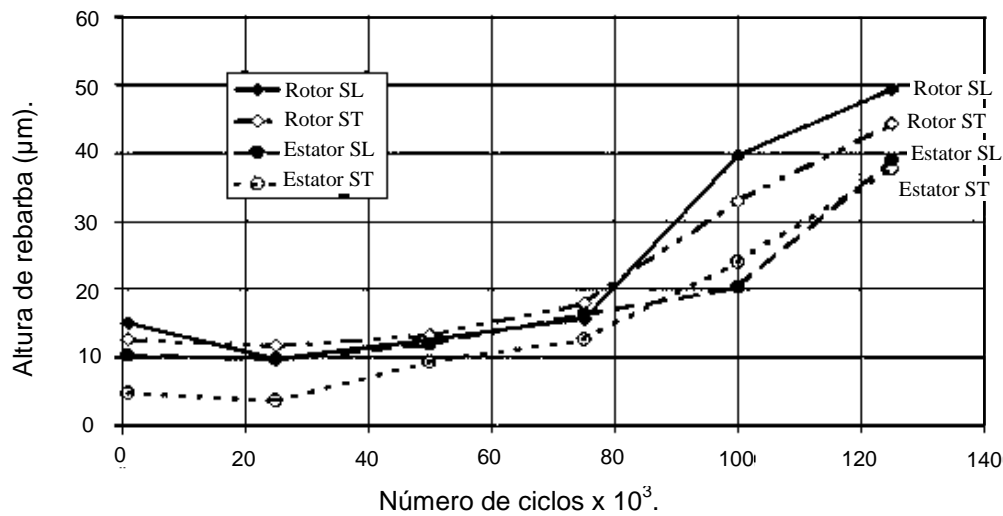


Figura 2.8 – Característica do processo de crescimento de rebarba para estampagem do aço elétrico E170 (%1,6 Si) com punção de aço DIN 19.573 e matriz de aço DIN 19.581 ambos com 62 HRC de dureza, segundo (Greskovic et al - 2002).

Observa-se na Fig. 2.8, que à medida que aumenta o número de ciclos de estampagem de uma ferramenta a altura de rebarba aumenta consideravelmente, tanto no sentido longitudinal (SL) como no sentido transversal (ST) de laminação do aço elétrico. O mesmo comportamento ocorre independente da peça estampada (estator ou rotor) chegando a uma altura de rebarba de 50 μm com 120.000 ciclos de estampagem.

Quanto ao desgaste na lateral, pode-se dizer que para a estampagem de um aço elétrico com 0,5 mm de espessura, o desgaste é cerca de 1 mm de comprimento ao longo de tal superfície, pois é necessário que o cavaco seja fixado na matriz e não volte à zona de estampagem.

Com a busca constante da diminuição do consumo de energia elétrica em motores, principalmente exigência do mercado norte americano e europeu, tais motores evoluíram, como exemplo na composição química do aço elétrico. Desta forma, o teor de Si dos novos aços está cada vez maior, favorecendo o aumento do desgaste e quebras nas ferramentas de estampagem, devido à sua dureza.

O número de ciclos por reafiação das matrizes e punções das ferramentas diminui em função do aumento do percentual de silício do aço elétrico, conforme mostra a Tab. 2.1.

Tabela 2.1 – Influência da variação do percentual de silício do aço elétrico na produtividade da ferramenta. (Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT - 1997).

Teor de Si (%)	Ciclos/afiação ($\times 10^3$)
0,0 a 0,6	120/150
0,6 a 1,3	100/120
1,4 a 2,2	80/100
1,7 a 3,0	60/80

Na Tab. 2.1, nota-se com o aumento do percentual de Si dos aços para motores elétricos ocorre um aumento no desgaste dos punções e matrizes. Sendo assim, a qualidade destes componentes terá relevância para o rendimento de estampagem e vida da ferramenta.

Os resultados mostrados na Fig. 2.8 e Tab. 2.1, são para estampagem com punções e matrizes fabricados a partir de aço ferramenta para trabalho a frio. Tais aços eram usados nas indústrias antes do início da aplicação do metal duro para este processo. Estes resultados podem ser comparados para punções e matrizes de metal duro, com a diferença de que o número de ciclos para o metal duro, conforme citado no subcapítulo 2.3, varia de 4 a 5 milhões de ciclos entre reafiações para se obter desgaste semelhante e conseqüentemente altura de rebarba de 50 μm .

2.3 Propriedades dos metais duros usados para fabricação de ferramentas de estampagem de motores elétricos.

Com o advento da metalurgia do pó, novos materiais para uso na indústria foram sendo fabricados e aplicados com grande sucesso. Um deles é o metal duro, ou carbetto de tungstênio (WC-Co), que é fabricado pelo processo intitulado como hot isostatic pressing - HIP ou prensagem isostática a quente. As vantagens do metal duro em relação aos aços ferramentas é a sua maior resistência ao desgaste e em se tratando da cerâmica sua maior tenacidade.

Segundo Lenel (1980), um metal duro original consiste em uma estrutura de grãos de carbetto de tungstênio (WC) embutido em um ligante de cobalto (Co). Esta é a ainda a mais importante composição de um ponto de vista de quantidades comercialmente produzidas. Carbetos cementados (metais duros) combinam alta dureza e resistência ao desgaste devido às fases de carbetos e suficiente resistência mecânica devido a sua fase de liga metálica, fazendo com que os mesmos sejam

usados em muitas aplicações, por isso, logo após descoberto, este novo material passou a ser utilizado para usinagem em substituição aos aços rápidos.

Segundo Marcondes (1990), o metal duro é composto de materiais, como o carbureto de tungstênio (WC), carbureto de titânio (TiC) e carbureto de titânio-nióbio (NbTiC), suportados num metal liga, como o cobalto (Co), que lhe confere tenacidade.

O químico Georg Brandt conseguiu isolar o cobalto e Carl Wilhem Scheele e Torben Bergman, conseguiram isolar o tungstênio pela primeira vez, em 1783. Seu desenvolvimento foi realizado por cientistas como Jons Jacob Berzelius e o início da aplicação prática foi realizado por empresas como a Stellite em 1912 e Sandvik na década de 20. Um exemplo são as trefilas de carbeto de tungstênio fundido em forno com eletrodos tubulares de carbono, realizado em 1914 por H. Voigtlander e H. Lohmann. Por H. Lohmann foi introduzido a tecnologia dos metais duros sinterizados, ou seja, a transformação do metal duro em pó fino e prensagem com aplicação de calor até quase o ponto de fusão. Foram realizadas combinações do carbeto de tungstênio com metais ferrosos, como cromo e titânio, por G. Fuchs e A. Kopietz onde foram produzidas, por fusão ou por sinterização sob pressão, ligas duras e consideravelmente mais tenazes, denominadas de Tizit, com composição de 45 a 60% de tungstênio, de 0 a 10% de cromo, 3,5 a 6% de titânio, 30 a 40% de ferro e 3,5 a 4,5% de carbono.

Sob orientação de P. Schwarzkopf, foram realizados estudos para aumentar a dureza dos carbetos individuais e aumento da sua resistência à oxidação. O resultado proposto foi um metal duro com base em 42,5% de Mo_2C , 42,5% de TiC, 14% de Ni e 1% de Cr, que foi comercializado com o nome de Titanit e Cutanit. As pesquisas passaram então a diversificar-se entre as ligas com e sem tungstênio.

Segundo Lenel (1980), na metalurgia do pó, pós de metal são finamente divididos para serem consolidados dentro de dispositivos com o formato requerido. A seqüência mais comum de consolidação inclui a prensagem do pó em uma matriz de compactação e sinterização do compactado, no qual significa aquecer a temperatura abaixo do ponto de fusão do metal ou liga para se obter as propriedades físicas, químicas e mecânicas desejadas.

A prensagem isostática a quente (HIP) é o processo atualmente usado para fabricação de blocos de carbeto de tungstênio. O processo HIP foi primeiramente estudado intensivamente em meados de 1950. Em 1960 no Battele Memorial

Institute foi estudado a técnica para a consolidação à quente de pós de metais refratários, cerâmicas e metal cerâmicos denominados de cermets.

Segundo Lämmle (1995), os fabricantes de ferramentas de estampagem, não possuem controles de garantia de qualidade em relação ao fornecimento do metal duro, sendo que na fabricação deste tal garantia está focada nas etapas de sua fabricação. Mesmo com parâmetros ideais no processo HIP, onde aplica-se temperatura aproximadamente de 1300 a 1500 °C e pressões de até 1000 bar em gás inerte, certa porosidade residual do metal duro não pode ser excluída e em casos onde ela é alta ocorre uma drástica redução da vida da ferramenta.

Segundo Sarin (1981), as propriedades dos compostos de carbetos de tungstênio (WC-Co) são criticamente dependentes de sua estrutura e composição final. Conforme ASM Engineered Materials Reference Book (1989), as propriedades mais representativas de algumas destas composições, podem ser vistas na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 – Propriedades representativas dos carbetos de tungstênio.

Carbeto de Tungstênio (% em peso)	Dureza (HV30)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à ruptura transversal (MPa)	Coefficiente de expansão térmica ($10^{-6}/K$)	Condutividade térmica (W/m.K)	Densidade (g/cm^3)
80%WC 20%Co	1050	490	2850	6,4	100	13,55
90%WC 10%Co	1625	580	2280	5,5	110	14,50
94%WC 6%Co	1900	673	1600	5,0	110	15,25
90%WC 10%Co, Ti, Ta, Nb	1500	510	2000	6,1	40	11.40

Publicada pela Society of American Tests and Materials (ASTM), a recomendação da prática de avaliação aparente do tamanho de grão e distribuição dos carbetos de tungstênio é dada conforme (ASTM-B 390) comparado com uma estrutura metalográfica padrão com 1500 vezes de ampliação. As Fig. 2.9, Fig. 2.10 e Fig. 2.11, mostram exemplos de metalografias de carbetos de tungstênio ligados com cobalto, segundo Ceratizit (2008).



Figura 2.9 – Microestrutura de um metal duro tipo TSM 30 -10%Co+90%WC, tamanho de grão de WC de 0,7 µm. (Ceratizit - 1500x).



Figura 2.10 – Microestrutura de um metal duro tipo H40S - 12%Co+88%WC, tamanho de grão de WC de 1,5 a 2,0 µm. (Ceratizit - 1500x).



Figura 2.11 – Microestrutura de um metal duro tipo B40S - 12%Co+88%WC, tamanho de grão de WC de 3,0 a 5,0µm. (Ceratizit - 1500x).

Em ferramentas a adição de Co no metal duro pode variar em pequenas quantidades de 3% a 13%. Para peças resistentes ao desgaste sem a aplicação de impacto, pode chegar até 30%. A média usual de tamanho das partículas do WC varia de 1 a 10 µm. Com o aumento do tamanho de grão e aumento do percentual de Co, ocorre uma diminuição da dureza. Segundo Lämmle (1995), a interação entre estas propriedades (tenacidade e dureza) é determinada principalmente por dois

fatores, o tamanho do grão de WC e percentual de Co. Na Fig. 2.12 pode-se observar esta característica.

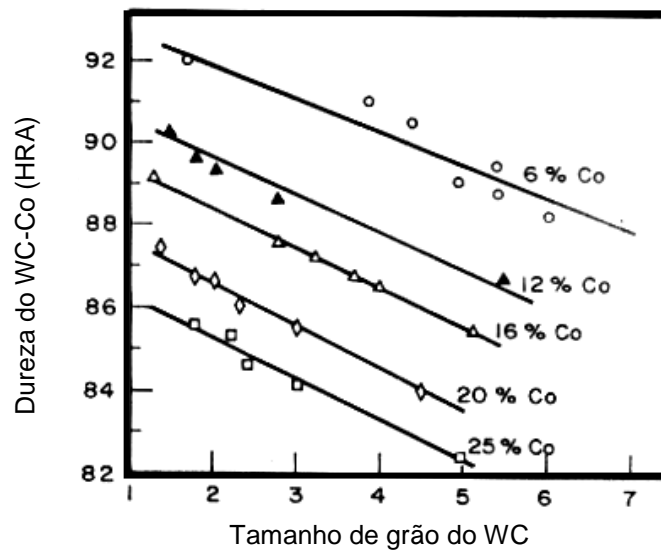


Figura 2.12 – Dureza (HRA) do metal duro (WC-Co) com diferentes tamanhos de grãos em função de diferentes percentuais de Co. (Lenel - 1980).

Como regra geral, com o aumento da dureza há o aumento da resistência ao desgaste e diminuição da resistência ao impacto ou tenacidade. Uma outra segunda importante propriedade dos carbeto de tungstênio é sua resistência à ruptura transversal. Esta propriedade foi padronizada pela Society of American Tests and Materials (ASTM B 406). Segundo Gurland e Bardzil (1955), esta também depende do percentual de Co e tamanho de grão do WC.

Portanto, as principais propriedades mecânicas que devem ser analisadas para aplicação do metal duro em ferramentas de estampagem que afetam diretamente na sua vida, são a sua dureza, tenacidade e resistência à ruptura transversal. É válido ressaltar que as maiorias dos fabricantes possuem suas próprias classes do metal duro, ou seja, os mesmos criam a sua classificação dentre os diversos tipos de metal duro que produzem.

Atualmente, as indústrias de motores elétricos utilizam basicamente classes de metais duros que variam em suas composições de 10 a 15% de Co e 80 a 85% de WC, com poucas variações de composição e liga. Como por exemplo, percentuais residuais de cromo, titânio, rênio e níquel, onde estes, no momento da usinagem, ajudam a diminuir a dissolução do cobalto que ocorre com o dielétrico usado no processo de eletroerosão.

Segundo Lämmle (1995), o cobalto é usado como “ligante” e promove a tenacidade dos modernos tipos de metal duro usados para estampagem. Entretanto como este não é um metal nobre, há a ocorrência de uma reação eletroquímica em contato com o dielétrico. Geralmente a água (H_2O) é utilizada como dielétrico e possui alta concentração de íons de hidrogênio (H^+), onde acontece a corrosão em forma de “pitting” que significa a dissolução do cobalto. Este assunto é tratado com ênfase no próximo capítulo por estar relacionado também com parâmetros do processo de usinagem por eletroerosão.

Atualmente a propriedade do metal duro de maior oferta no mercado é sua resistência a dissolução do cobalto da camada limite causada pela eletroerosão. Esta propriedade também deve ser considerada importante na fabricação de ferramentas de estampagem e está sendo motivo de pesquisas entre fabricantes e universidades com a substituição do cobalto pelo níquel. Entretanto não é apenas a integridade da superfície usinada pela eletroerosão que garantirá os melhores resultados na estampagem, mas também as propriedades mecânicas do metal duro.

As novas composições de metal duro oferecem elementos de liga em união com o Co, como exemplo Ni, Ti, Cr e Re. Conforme descrito estes ajudam a aumentar a resistência à corrosão ou dissolução do ligante. A Fig. 2.13 mostra esta propriedade.

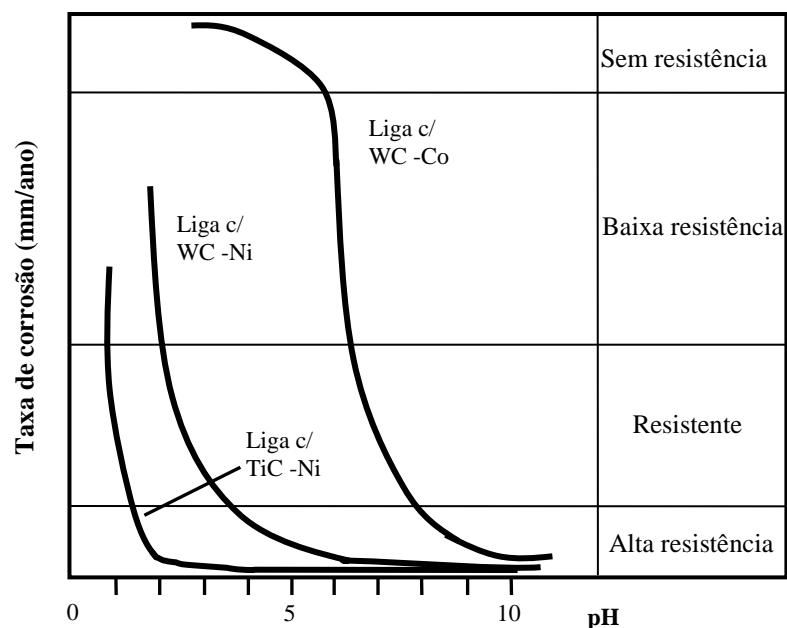


Figura 2.13 – Resistência à corrosão em função do pH para diferentes ligas de metal duro com variação do percentual de Co. (Sandvik - 2007).

Existem vários fabricantes de metal duro para estampagem, muitos, detentores das melhores tecnologias de fabricação, aplicação e pesquisas deste material. Entre os maiores e mais utilizados pode-se citar a Ceratizit, Sandvik, Boehlerit, Vista e Durit. No mercado nacional pode-se citar a Brassinter.

Nota-se então, que não se pode usar qualquer tipo de metal duro para estampagem de lâminas de motores elétricos. Existe um tipo de metal duro conforme o percentual de Co e tamanho de grão do WC, que gera um melhor custo benefício para este processo em termos de resistência ao desgaste e quebras. Por isso o metal duro não pode ser adequado apenas para otimização dos resultados da eletroerosão, como exemplo na taxa de corte V_w e danificações na superfície usinada. Este requisito é selecionado primeiramente pelo processo de estampagem, apesar da sua grande influência neste processo de usinagem.

Os assuntos tratados neste capítulo mostram alguns conceitos e exigências do processo de estampagem de lâminas para motores elétricos. Pode-se analisar que a integridade da superfície usinada das matrizes e punções da ferramenta de estampagem, deve estar em perfeitas condições para garantir um processo com qualidade e bom rendimento.

3. FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE USINAGEM POR ELETROEROSÃO

3.1 Introdução

Segundo Dibitongo et al (1989), a eletroerosão ou Electrical Discharge Machining (EDM), estabeleceu seu avanço e importância durante os anos devido a sua habilidade em usinar e dar forma a uma grande variedade de materiais sólidos. Isto tem creditado uma soma de mais de 2% em relação aos processos de usinagem. Materiais avançados como cerâmicas, compósitos e cermets o qual são difíceis de dar formas por processo convencionais de usinagem, são usinados com sucesso pela EDM. Conforme Gadalla (1993), este processo oferece vantagens óbvias. Enquanto os processos de usinagem tradicionais requerem contato sólido-sólido entre a ferramenta e a peça, a EDM oferece um processo de “não contato”, portanto, este processo não exerce força física na peça a ser usinada.

Segundo Amorim e Weingaertner (2004), este processo de usinagem é utilizado especificamente quando formatos geométricos complexos, como matrizes, punções e ferramentas de moldagem de plásticos por injeção, são produzidos em materiais difíceis de usinar.

Para Klocke e Nöthe (1997), a principal aplicação da EDM é a produção de ferramentas. Desenvolvido devido ao seu princípio térmico de remoção de material, no qual permite a usinagem em materiais duros, com condutividade elétrica e para geração de formas complexas. O desenvolvimento contínuo das máquinas ferramentas contribuiu para o alcance de altas taxas de corte V_w , qualidade e exatidão geométrica das superfícies usinadas. Assim, existem várias aplicações que não competem tecnicamente com a EDM. Acima de tudo, existe hoje um alto grau de automação e facilidades operacionais nas máquinas modernas de EDM para fabricação de ferramentas. Este processo tornou-se uma alternativa eficiente em comparação aos processos convencionais de usinagem.

As principais variações da eletroerosão são a EDM por penetração, principalmente usada na fabricação de moldes e matrizes, e a EDM por fio ou Wire Electrical Discharge Machining - WEDM, aplicada na produção de ferramentas de estampagem, puncionamento e extrusão.

Segundo Matsuo et al (1992), a demanda de EDM está crescendo rapidamente na indústria e ferramentarias, pois está sendo usado especialmente na fabricação de peças sinterizadas e cerâmicas devido à possibilidade de usinagem independentemente da dureza e tenacidade destes materiais.

3.2 Conceitos da eletroerosão por descargas elétricas

Segundo Sommer et al (1994), embora a usinagem por descargas elétricas seja considerado um meio moderno de remoção não convencional de metal, este processo é empregado na sua forma atual desde os anos 50.

As reações físico-químicas originárias pela passagem de uma corrente elétrica através de duas superfícies metálicas, separadas a uma distância e mantidas num recipiente com solução pré-determinada ou ao ar livre, já eram conhecidas no início do século XX. Através da passagem de corrente, basicamente os seguintes efeitos são observados:

- a) Ocorre a simples remoção de partículas metálicas de ambas ou apenas de uma das superfícies, dada como erosão, conforme Fig. 3.1a;
- b) Ocorre a remoção de partículas metálicas de uma das superfícies depositando-se sobre a outra formando uma camada homogênea, dada como eletrólise. Conforme Fig. 3.1b.

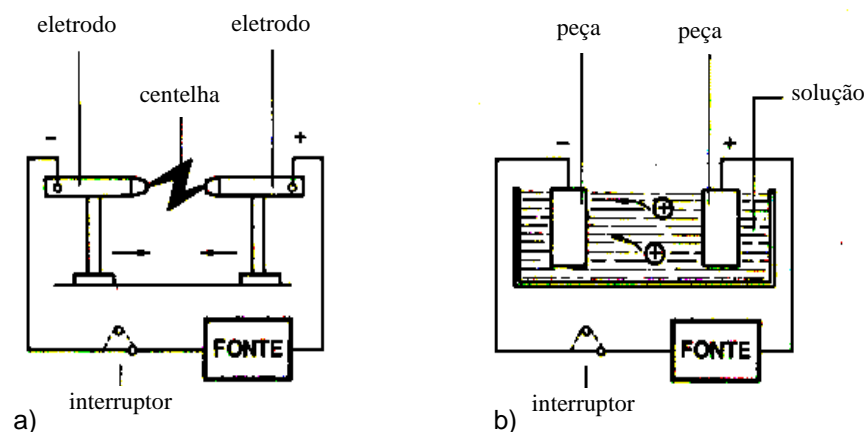


Fig. 3.1(a) Esquema representativo da erosão. (b) Esquema representativo da eletrólise. (Sommer et al - 1994).

O processo foi primeiramente reconhecido durante a segunda guerra mundial por um russo chamado Lazarenko, que desenvolveu o circuito original para eletroerosão por penetração.

Segundo Heuvelman (1969), em um trabalho de investigação com intuito de eliminar o desgaste de contatos elétricos, Lazarenko observou que a capacidade destruidora de uma descarga elétrica poderia ser utilizada para usinagem dos metais. Iniciaram-se assim, pesquisas visando aumentar a capacidade de controle sobre os parâmetros de usinagem do processo. A finalidade era obter resultados para indústria da então União Soviética.

A primeira aplicação industrial de uma máquina-ferramenta para EDM surgiu no final de 1940. Nesta, sucessivas faíscas (centelhas) eram produzidas entre dois eletrodos submersos num meio líquido. As faíscas eram geradas por meio de um gerador de descargas elétricas chamado de circuito de relaxação (RC) e batizado como circuito Lazarenko. A Fig.3.2 mostra uma representação esquemática deste circuito.

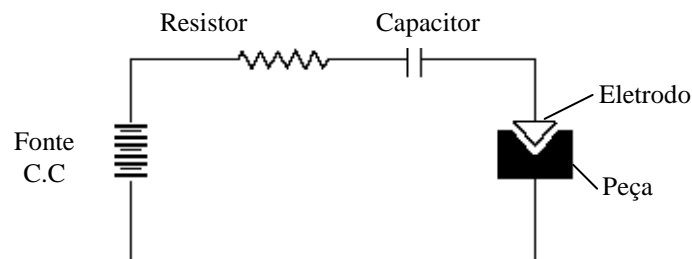


Fig. 3.2 – Esquema representativo do circuito Lazarenko. (König e Klocke -1997).

O gerador de relaxação funciona como um circuito oscilatório, onde a corrente e a tensão de trabalho se invertem periodicamente até o descarregamento quase total da energia elétrica armazenada nos capacitores. Promovendo a obtenção de superfícies com alto grau de acabamento pela diminuição ou mesmo à eliminação da formação de arcos elétricos e curtos-circuitos entre os eletrodos.

3.3 Generalidades do processo de eletroerosão

Segundo ENGEMAQ (1986), o processo de eletroerosão é basicamente a remoção de material da peça através dos efeitos térmicos, por meio de uma descarga elétrica entre o eletrodo e a peça. Existem variações do processo de eletroerosão, dados por um grupo principal na norma DIN 8580. Pode-se descrever

dois tipos básicos e mais usuais deste processo de usinagem, a eletroerosão por penetração e por fio. As Fig. 3.3a e Fig. 3.3b mostram representações esquemáticas destes processos.

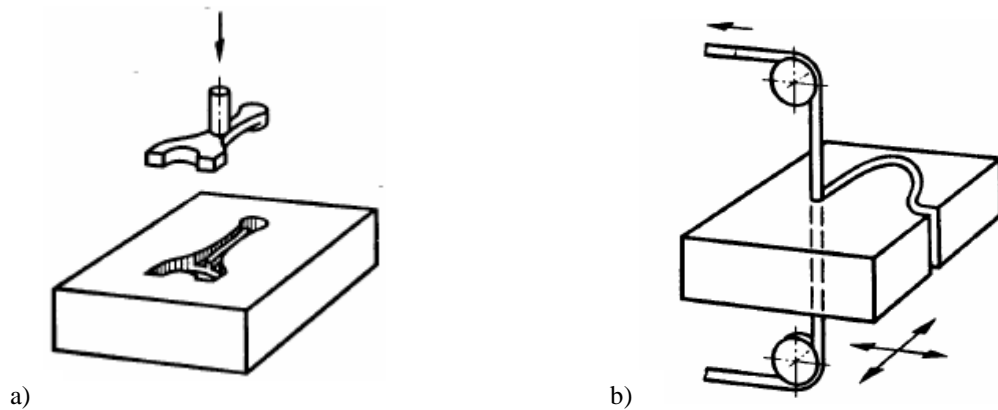


Fig. 3.3 (a) Esquema representativo da eletroerosão por penetração. (b) Esquema representativo da eletroerosão por fio - WEDM. (ENGEMAQ -1986).

Segundo Klocke e Nöthe (1997), o sistema de eletroerosão consiste basicamente nos quatros seguintes componentes:

- Máquina ferramenta;
- Gerador;
- Controles de alimentação;
- Sistema de dielétrico.

O gerador fornece a energia elétrica necessária para descargas elétricas. Geradores de pulsos estáticos fornecem pulsos de voltagem direta e corrente acima de 500 A, que é o estado da arte para EDM penetração. A função dos controles de alimentação é adaptar a fenda de trabalho com as condições da usinagem. Filtros e refrigeração no caso de uso da água deionizada, é incumbência do sistema de dielétrico. A Fig. 3.4 mostra uma ilustração das variações da EDM. Nota-se que a geometria desejada da peça à ser fabricada é obtida do formato do eletrodo ferramenta e respectivamente pelos movimentos gerados pelo controle numérico (CN) no eletrodo.

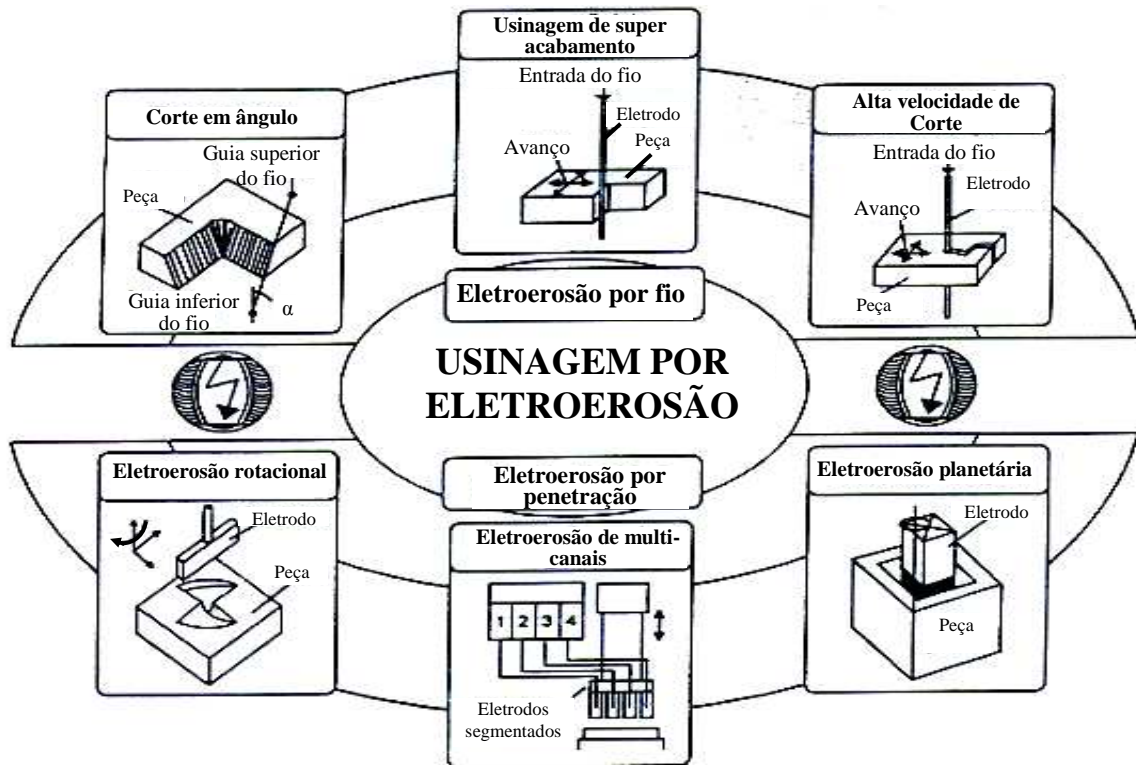


Fig. 3.4 – Principais variações da eletroerosão por penetração e por fio ou WEDM. (Klocke e Nöthe - 1997).

A eletroerosão planetária possui vantagens na criação de formatos cônicos, rasgos internos e afiação de gumes com formatos simples de eletrodos, que é usado em movimento orbital.

A eletroerosão de multi-canais ou canais múltiplos é aplicada para grandes áreas de usinagem, como em ferramentas para conformação de metais, através da segmentação dos eletrodos e fornecimento de potências individuais para cada segmento. Neste processo, alta taxa de corte V_w é obtida.

A eletroerosão rotacional, chamada de “path”, é caracterizada pelo movimento do eletrodo nas direções x, y e z. O custo do eletrodo é reduzido enquanto uma variedade de formas e geometrias pode ser produzida. A retificação eletroerosiva representa um dos últimos desenvolvimentos nesta área. Os movimentos dos eixos x, y e z são combinados com uma rotação cilíndrica ou cônica de um eletrodo de formato de um pino ou tubo.

A eletroerosão por fio produz superfícies em formatos de furo onde ângulos são fabricados até 30° de inclinação (corte em ângulo). Usualmente, a operação eletroerosão por fio inclui dois sucessivos “passes” ou cortes. No corte principal (regime de desbaste), aplica-se alta energia de descarga e é realizado

primeiramente para o corte da geometria desejada no material o mais rápido possível. Os cortes secundários (regime de acabamento) são sucessivos “passes” para se atingir a qualidade da superfície usinada e exatidão geométrica desejada.

3.4A eletroerosão por fio - WEDM

Segundo Sommer et al (1994) em 1969 a empresa suíça Agie produziu a primeira máquina de WEDM no mundo. No começo dos anos 70 ela usinava a uma taxa de corte V_w de 21,5 mm²/min, entretanto no início dos anos 80 ela usinava a uma taxa de 64,5 mm²/min.

A Fig. 3.5 apresenta uma representação esquemática do panorama internacional de utilização da WEDM na indústria metal-mecânica, segundo Charmilles (2002).

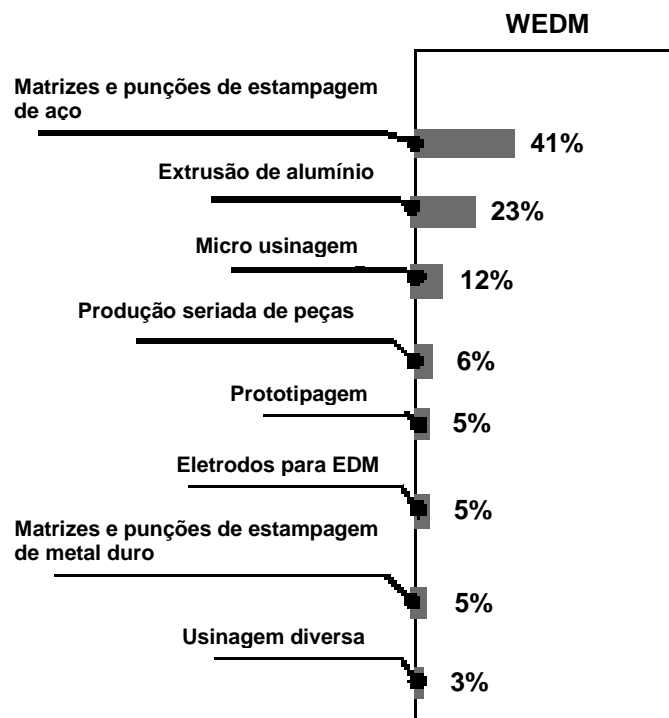


Figura 3.5 - Panorama de utilização da WEDM. (Charmilles – 2002).

Observa-se que 5% do total da utilização da WEDM corresponde a usinagem de matrizes de estampagem de metal duro. No entanto, segundo Charmilles (2002), a tendência mundial é aumentar a utilização da WEDM na produção de ferramentas de estampagem deste material.

Desde os esforços da pioneira Agie, em 1969, muitos desenvolvimentos foram realizados neste campo. Pode-se exemplificar os geradores mais potentes com controladores digitais para desbaste com alta velocidade de corte, geradores para finos acabamentos e sistemas anti-eletrólise para não danificar a superfície da peça e não alterar a estrutura inicial do material. Microprocessadores que permitem controlar e corrigir a trajetória do fio nos eixos X, Y, U e V, garantindo a exatidão geométrica nos contornos da peças usinadas.

Avanços na construção mecânica das, como empregos de materiais cerâmicos para melhorar estabilidade térmica, motores de corrente contínua e alternada com resolução de 0,0001mm, aperfeiçoamento no sistema de lavado ou jato do dielétrico aplicado para remoção do material usinado estão continuamente sendo realizados. A Fig. 3.6, mostra uma representação de máquina para WEDM com seus componentes e sistemas principais.

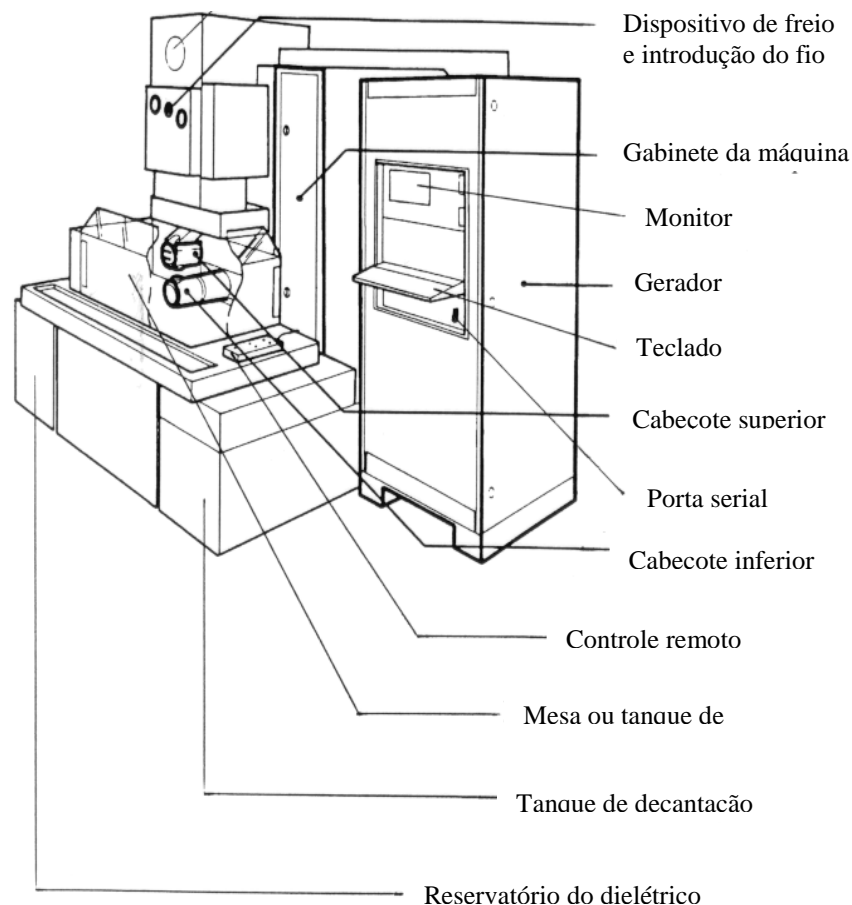


Figura 3.6 – Representação de máquina para WEDM. (Sommer et al - 1994).

O dispositivo do freio e introdução do fio é responsável pela regulação da tensão mecânica do fio e introdução automática. O gabinete da máquina é

responsável pela interface entre o gerador e o cabeçote. O monitor serve para visualização dos parâmetros de usinagem, acompanhamento do processo, comportamento da máquina, simulação da usinagem corte e edição e correção de programas. O gerador tem a função de transformar corrente alternada em contínua e depois em impulsos retangulares. Ele gerência todos os parâmetros elétricos necessários para usinagem. O teclado serve para inserir dados, editar e alterar programas, parâmetros, tabelas de tecnologia. No cabeçote superior situa-se a câmara de injeção superior, sistema de corte do fio, guia superior, contato superior. O porta serial é responsável pela comunicação de dados externos.

No cabeçote inferior situa-se a câmara de injeção inferior, guia inferior, contato inferior, correias transportadoras do fio e outros componentes. Pelo controle remoto se faz todos os movimentos dos eixos, injeção de fio, corte de fio, enchimento e esvaziamento do tanque, alinhamento de peças, por exemplo. Na mesa, situada dentro do tanque é onde as peças de trabalho são fixadas para a usinagem. Normalmente as máquinas possuem tanque de decantação onde a água suja com partículas do material usinado fica para uma decantação. O reservatório de dielétrico é o compartimento onde fica a água já filtrada pronta para utilização. A água é ainda deionizada em compartimentos com resinas especiais para retiradas dos íons. Tais resinas, são chamadas de resinas deionizadoras e são consumidas durante a usinagem.

Atualmente há dezenas de fabricantes de máquinas de WEDM, sempre buscando aperfeiçoamentos devido à disputa de mercados e para atender as necessidades dos usuários que buscam melhores avanços tecnológicos. Os fabricantes de maior destaque são os suíços e japoneses: Agie, Charmilles, que atualmente uniram esforços formando a GF Agie-Charmilles; Mitsubishi, Fanuc, Sodick, Makino entre outras. Segundo Mitsubishi (2007), atualmente são produzidas máquinas de WEDM que atingem taxa de corte de $500 \text{ mm}^2/\text{min}$. Segundo GF Agie-Charmilles (2007), a usinagem por WEDM atualmente gera superfícies com rugosidade R_a de $0,05 \text{ }\mu\text{m}$.

3.5 Tipos de máquina de WEDM

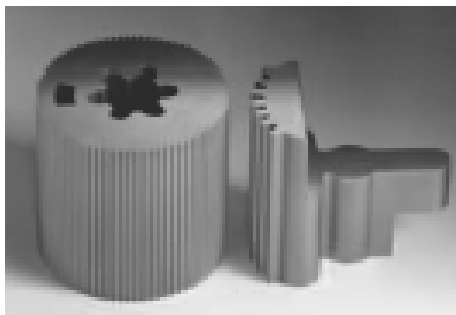
Existem dois tipos de variações em máquinas de WEDM, que diferem pela submersão da peça no dielétrico (tipo submerso) e apenas aplicação do jato de

lavado sobre esta (tipo não submerso). Estes podem ser descritos resumidamente como:

Submerso: A peça de trabalho fica imersa no dielétrico, geralmente água deionizada. Há um aumento da exatidão geométrica de usinagem e taxa de corte V_w , porém há um maior consumo de resina devido ao maior volume de água deionizada usado no processo. Existe difícil visualização da peça devido à contaminação da água pelo material removido e transformado em pequenas partículas.

Não submerso: Neste tipo de variação, existe apenas um jato do dielétrico sobre a peça de trabalho. É um sistema que consome menores quantidades de resina, a superfície da peça fica limpa e a visualização do trabalho é melhor, porém a rugosidade e exatidão geométrica são piores que o tipo submerso e certa dificuldade do processo ocorre em cortes interrompidos.

Algumas peças fabricadas a partir do processo de WEDM podem ser exemplificadas na Fig. 3.7a e Fig. 3.7b.



a)



b)

Figura 3.7. (a) Exemplo de matrizes fabricadas pelo processo de WEDM. (Agie -2007). (b) Exemplo de peças decorativas fabricadas pelo processo de WEDM. (Brasimet -2002).

3.6 Funcionamento da WEDM

Segundo Sommer et al (1992) a peça de trabalho e o fio representam os terminais positivos e negativos do circuito elétrico. Eles estão sempre separados por uma fenda de trabalho constantemente mantida pela máquina. Esta fenda deve estar sempre cheia de fluido dielétrico, neste caso a água deionizada, que atua como isolante e agente de limpeza. De igual importância é o fluxo forçado de dielétrico (lavado), que expulsa as partículas eletroerosionadas da fenda de trabalho.

Faíscas são formadas através de uma seqüência de rápidos impulsos elétricos, criados pelo gerador da máquina milhares de vezes por segundo. Cada

faísca forma um canal de ionização de extremo calor e pressão, resultando em fusão e vaporização das seções localizadas da peça usinada. Os “escombros” ou “detritos” metálicos vaporizados por este processo, vindos do material da peça e do material do fio, são expulsos pelo escoamento sob pressão do fluido dielétrico, através da fenda de trabalho. Estas partículas resultantes da usinagem são removidas e separadas por um sistema de filtragem. Muito material ejetado na fenda de trabalho pode diminuir a ionização e bloquear a descarga elétrica até se extinguir completamente ou produzir um curto-circuito.

Como a máquina avança o fio através da peça, o mesmo corta uma abertura um pouco maior que seu diâmetro. Uma vez que o fio é também eletroerosionado, há a ocorrência do seu desgaste e por isso ele é descartado e a máquina alimenta novo fio para continuar o processo.

A Fig. 3.8 mostra uma representação esquemática do funcionamento do processo.

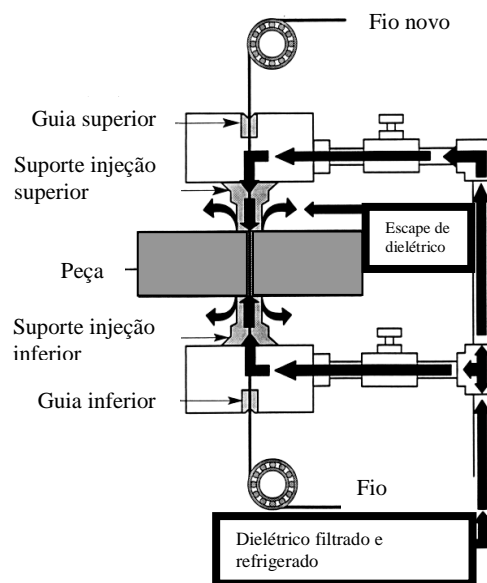


Figura 3.8 – Esquema representativo do sistema de movimentação do fio e fluxo do dielétrico no processo de WEDM. (Sommer et al -1992).

Realiza-se o processo de deionização da água para remoção dos íons positivos e negativos existentes, que variam em quantidade dependendo da qualidade e procedência da água. O uso de água com elevadas quantidades de íons diminui a vida da resina deionizadora que é dividida em dois tipos, chamadas de resina aniônica e resina catiônica. A resina catiônica remove os íons positivos, enquanto a aniônica, remove os negativos. Ambas trabalham juntas e formam uma

mistura eficiente para a deionização da água que exerce influência sobre as características de trabalho da WEDM. Antes da descarga elétrica a água atua como um resistor, finalizada a descarga elétrica, ela atua como um agente de refrigeração e limpeza, retirando todo material usinado decorrente da erosão.

3.7 Conceitos sobre o fio da WEDM

Segundo Sommer et al (1992), as propriedades físicas e térmicas do fio usado no processo de WEDM são importantes. Um exemplo é seu ponto de fusão, determinado pela sua composição. Uma das características desejadas é ter algum desgaste do fio para promover uma abertura maior na fenda de trabalho, prevenindo pequenos curtos circuitos.

Muito calor pode ser gerado no corte via WEDM, parte deste é absorvido pelo fio. Esta perda reduz o desempenho do processo de WEDM, entretanto se calor demais é transferido para o núcleo do fio, pode ocorrer sua ruptura. Outra propriedade importante é a rapidez de vaporização. Todo material possui um ponto de fusão e cria pressão de vapor quando aquecido. Uma das qualidades exigidas para um fio de eletroerosão é o baixo ponto de fusão e alta pressão de vapor para ajudar a expelir os detritos da fenda de trabalho, pois quando o fio e a peça vaporizam ao invés de fundir, geram-se gases ao invés de partículas de metais na fenda de trabalho. Isto diminui as partículas de metal à serem expulsas melhorando o processo de limpeza.

Segundo Eroma EDM (2007), algumas propriedades são desejáveis em um fio para eletroerosão. As principais podem ser destacadas:

- Alta condutividade térmica e elétrica;
- Retidão e diâmetro constante;
- Alta resistência;
- Alto acabamento de superfície.

Os fios para eletroerosão devem apresentar baixos índices de impurezas, como por exemplo, o chumbo, que não possui propriedades mecânicas necessárias para trabalhos em altas temperaturas. Devem ter boa condutividade elétrica, pois os geradores das máquinas poderão exceder correntes de descargas de 45 A. A transferência desta energia deve ser eficiente e bem distribuída na fenda de

trabalho. Os fios devem ser capazes de produzir alta frequência e baixa amperagem para usinagem de superfícies com bom acabamento, como exemplo rugosidade R_a igual a $0,2 \mu\text{m}$ ou menor.

A exatidão geométrica é uma propriedade que influencia nas características do processo de WEDM. Quando se deseja resultados de trabalho de alta exatidão geométrica, os fios também devem ser fabricados com alta exatidão. Para processos de alta velocidade de usinagem (High Speed Machining-HSM) o fio pode ter baixa exatidão no seu diâmetro. Alta resistência à tração possibilita maior controle de tensão e melhora o acabamento na superfície usinada. Alguns tipos de fios podem ser destacados:

- Fio de latão;
- Fio de latão com adição de alumínio;
- Fio de latão ou cobre com revestimento de zinco;
- Fio de molibdênio;
- Fio de tungstênio;
- Fio de cobre.

O fio de latão, assim popularmente chamado, é uma liga metálica resultante da mistura do cobre e do zinco. O alto percentual de zinco geralmente é melhor, porém se sua concentração for grande o fio torna-se frágil e de fácil ruptura. Um balanço adequado entre cobre e zinco para uso na WEDM é 63%Cu e 37%Zn. Dependendo do processo de produção do fio de latão, três tipos diferentes são fornecidos (mole, duro e extra-duro).

O fio de latão com adição de alumínio foi desenvolvido com objetivo de melhorar a composição do fio de latão original de composição 63%Cu+37%Zn ou 65%Cu+35%Zn. Para tal foram adicionados 2% de alumínio. Com esta composição, consegue-se maior dureza que possibilita o aumento da resistência à tração.

Fio de latão ou cobre com revestimento de zinco: Conhecido por “fio de zinco” possui núcleo de latão ou cobre com revestimento de zinco. É capaz de obter maiores taxas de corte, pois combina a alta condutividade elétrica do cobre com o efeito de um melhor resfriamento oferecido pelo zinco, devido ao seu ponto de fusão e vaporização ser mais baixo do que o do cobre.

Segundo Amorim e Teixeira (2005), são obtidos com fio de cobre revestido com zinco melhores resultados de taxa de remoção V_w que o fio de latão sem

revestimento. Os autores descrevem resultado máximo para V_w igual a 45 mm²/min para o fio de cobre, contra 36 mm²/min para o fio de latão sem revestimento.

Vale ressaltar que este tipo de fio possui maior custo de aquisição se comparado com os fios de latão sem revestimento e deve ser avaliado o custo benefício do processo de WEDM para cada aplicação.

Os demais tipos de fios possuem baixa utilização na indústria nacional para fabricação de matrizes de aço e metal duro, pois são utilizados em outras aplicações específicas. A Tab. 3.1, destaca algumas propriedades e características dos principais tipos de fios.

Tabela 3.1 – Classes e suas respectivas propriedades mecânicas dos principais tipos de fios. (Sommer et al - 1994).

Tipo de fio	Resistência à tração (kgf/mm²)	Condutividade (Cu=100%)	Diâmetro de fornecimento (mm)	Tol. (mm)
Latão molde	40,0	20	0,20; 0,25 e 0,30	0,002
Latão duro	50,0	20	0,15; 0,20; 0,25 e 0,30	0,001
Latão extra-duro	90,0	20	0,10; 0,15; 0,20; 0,25 e 0,30	0,001
Latão + alumínio	122,0	21	0,2; 0,25 e 0,30	0,002
Com cobertura de zinco	45,70	73	0,25 e 0,30	0,002
	49,22	21	0,20; 0,25 e 0,30	0,002
Molibdênio	196,9	34	0,025; 0,05; 0,07; 0,10 e 0,125	0,002
Cobre	25,0	100	0,25; 0,30	0,002
Tungstênio	250,0	34,5	0,025; 0,03; 0,04 e 0,125	0,002

O fio de latão tipo extra-duro, atualmente é o mais utilizado para fabricação de peças de alta exatidão geométrica, como por exemplo, peças de ferramentas de estampagem. Além das vantagens citadas possui baixo custo e boa resistência a tração.

Na presente dissertação realizou-se um experimento entre tipos de fio, obtendo respostas conforme descritas no capítulo 5.

3.8 Princípio físico de uma descarga elétrica

Apesar de ser ainda um fenômeno de difícil medição e definição, pode-se descrever que a teoria que melhor define o fenômeno de remoção da descarga elétrica entre dois eletrodos, submersos em um meio líquido, é a teoria termoeletrica. Mas segundo König e Klocke (1997) e Dibitonbo et al (1989), não existe um modelo teórico que formule uma explicação completa de tais fenômenos ocorridos durante a faísca elétrica no processo de usinagem por eletroerosão.

Segundo König (1990) a teoria termoeletrica baseia-se em dois eletrodos posicionados de tal forma onde entre eles exista uma fenda. Nesta fenda, ocorrerá uma faísca elétrica com a imposição de uma tensão em tais eletrodos que rompa o isolamento do dielétrico.

Segundo König e Klocke (1997), Eubank et al (1993) e Dibitongo et al (1989), as fases consecutivas do processo de remoção de material por eletroerosão, ocorrem em quatro etapas. São elas:

- 1- Ignição da faísca;
- 2- Formação do canal de plasma;
- 3- Fusão e evaporação do eletrodo (pequenas quantidades);
- 4- Remoção do material fundido.

Conforme König (1997), os fenômenos físicos de uma faísca podem ser analisados como fenômenos energéticos e são divididos como:

- a) Mecanismo de ruptura do dielétrico;
- b) Desenvolvimento do canal de plasma;
- c) Fenômeno de transmissão de calor;
- d) Fenômeno de transporte de material.

A Fig. 3.9 mostra uma representação esquemática do comportamento dos principais parâmetros de uma descarga elétrica (faísca).

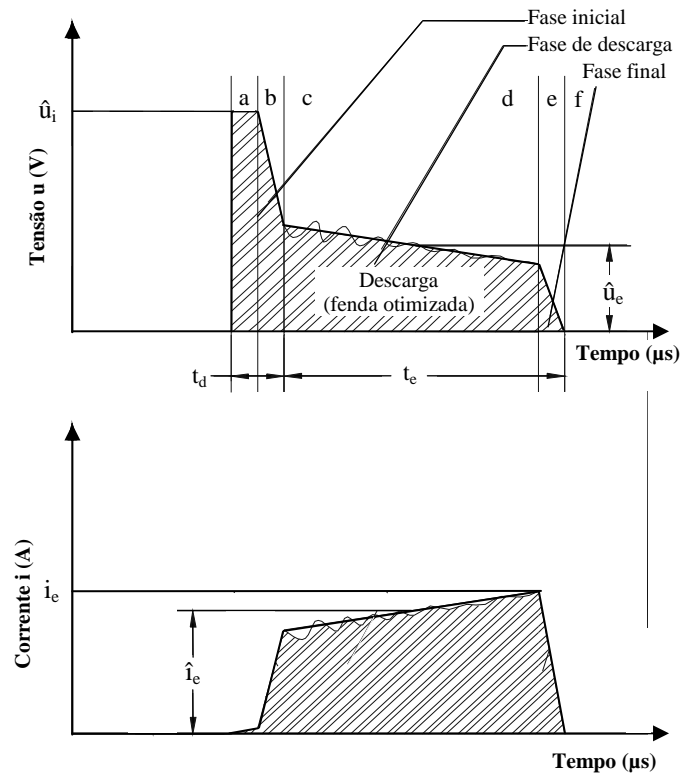


Figura 3.9 – Etapas da formação de uma descarga elétrica “faísca”. Parâmetros conforme norma VDI 3402. (König - 1997).

Na fase inicial “a” e “b” do processo de formação de uma faísca ou descarga elétrica, o mecanismo de ruptura do dielétrico pode ser explicado pelo chamado efeito da ionização por impacto (streamer). Neste ocorre a liberação de elétrons, geralmente dos picos de rugosidade do cátodo, na fenda de trabalho. Os elétrons são acelerados em direção ao ânodo ocorrendo colisões entre eles e as moléculas do dielétrico, gerando uma reação em cadeia. Inicia-se então o efeito (skin), onde a superfície da faísca no ânodo é maior que a do cátodo. A densidade de energia nas superfícies de contato da faísca chega a 10^6 a 10^7 A/cm². Segundo Dibitongo et al (1989), este fenômeno ocorre com fenda de trabalho igual a 40 μ m e tensão em aberto u_i igual a 200 V.

Como nesta etapa existe alta densidade de energia, tem-se a ruptura de partículas dos eletrodos numa região anelar devido às forças de campo elétrico.

Outra teoria para esta etapa de ruptura do dielétrico é definida pelo efeito “Joule”. Entretanto, conforme Kanhg et al (1977), esta, que pode ser chamada de teoria termomecânica, ainda não explica corretamente os efeitos totais da descarga elétrica, pois os resultados experimentais não a validam.

Segundo König (1997), na ionização por impacto ocorre simultaneamente a diminuição da resistência do dielétrico e aumento da corrente elétrica, gerando a formação de canais ou túneis de transporte de energia elétrica, chamados de “tunnel discharge streamers”. Como pode ser observado na Fig. 3.10, nesta etapa ocorre a queda de tensão \hat{u}_i e aumento da corrente de descarga \hat{i}_e . A formação do canal de plasma ocorre envolto por uma bolha de vapor e dielétrico, exercendo restrição de tal canal e concentrando energia em níveis enérgicos de 3 J/mm^3 , temperaturas de pico de $40.000 \text{ }^\circ\text{C}$ e pressão dinâmica de 3.000 bar .

O chamado tempo de retardo t_d , é o intervalo de tempo da aplicação da tensão \hat{u}_i até o início da descarga ou início da formação do canal de plasma.

Na fase de descarga “c” e “d”, o canal de plasma funde e evapora o material em ambos os eletrodos (fio e peça) ao longo do intervalo de tempo t_e , chamado de tempo de descarga. Isto é gerado pela alta energia de tal canal, dado pelo bombardeamento de elétrons do cátodo para o ânodo e de íons positivos do ânodo para o cátodo. Devido à condução térmica dos materiais dos eletrodos, há a formação de “poças” de material no estado líquido, que dependem em quantidade ao tempo de descarga t_e e corrente máxima i_e . Vaporizações dos eletrodos ocorrem, sendo pequenas e limitadas devido à alta pressão do canal de plasma. Como a massa dos elétrons do cátodo é menor que a dos íons positivos do ânodo, este último não tem tempo de acelerar de igual forma que os elétrons dentro do pequeno tempo de descarga t_e . Sendo assim, existe um maior aumento de temperatura e conseqüentemente material fundido pelas maiores descargas de elétrons, no ânodo.

A etapa de fenômeno de transporte de material acontece na fase final “e” e “f”, com o início da diminuição do canal de plasma e a interrupção da descarga elétrica. Nesta etapa, a bolha de gases e o canal de plasma entram em colapso e a parcela de material da superfície dos eletrodos, que está no estado líquido, é removida e expulsada para fenda de trabalho.

Segundo Amorim e Weingaertner (2004), a remoção de material se dá resumidamente pelo brusco colapso do canal de plasma onde o material é ejetado violentamente para fenda de trabalho. No intervalo entre as sucessivas descargas, conhecido como tempo de intervalo t_0 , uma parte do material fundido e vaporizado dos eletrodos é ejetado pelo fluxo do fluido dielétrico. Outra parte é solidificada e geram as bordas das “crateras” formadas no material.

Segundo Van Dijck (1973), essas crateras fazem parte da chamada camada branca ou “white layer”, por ficarem com coloração esbranquiçada na preparação das amostras após o ataque com reagente químico em uma análise metalográfica. A Fig 3.10 e Fig. 3.11 mostram um exemplo deste efeito, entre outros, gerados na camada limite de materiais usinados por eletroerosão por fio. Esses efeitos ou danificações, são fortemente influenciados pela energia de descarga W_e aplicada no processo WEDM.

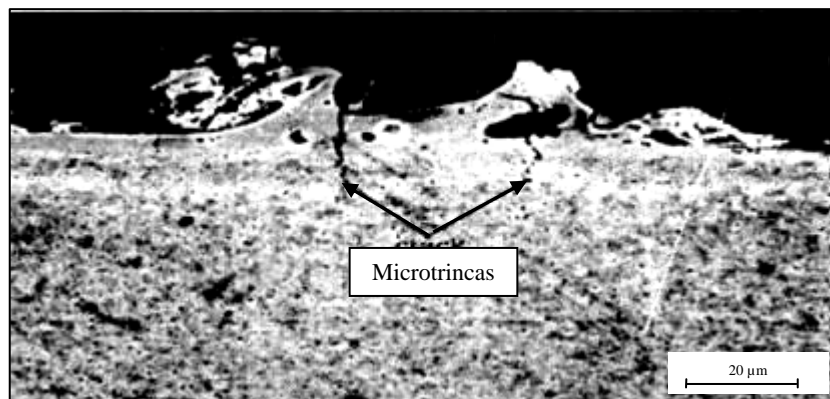


Figura 3.10 – Detalhe das danificações causadas pela eletroerosão. Corte em regime de desbaste. Metal duro com 85%WC -15%Co. Condutividade do dielétrico igual a 10 $\mu\text{S/cm}$. (Chang et al – 2003).

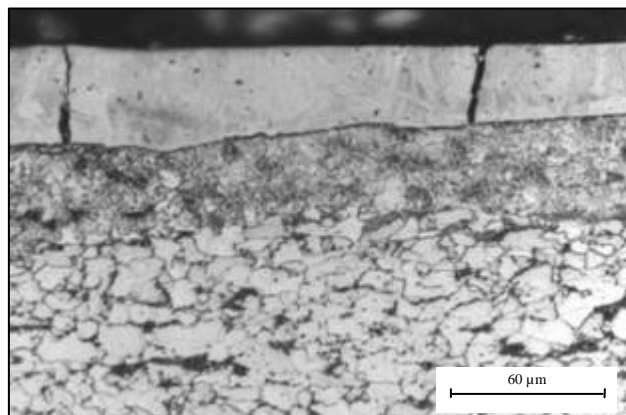


Figura 3.11 – Detalhe das danificações causadas pela eletroerosão. Material: Aço micro ligado. Energia de descarga W_e igual a 220 W, duração da descarga t_e igual a 800 μs , eletrodo de Cu. (Chang et al – 2003).

Segundo MDC (1980) a textura da superfície usinada por processos de remoção térmica de material, reflete a energia de aquecimento e o estado de fundição que ocorreu. A rugosidade da superfície e a precisão pode ser medida em diferentes direções. Quanto a integridade da superfície usinada, o impacto térmico é acompanhado por uma rápida extinção do aquecimento submerso em direção ao

centro das peças usinadas. Essas ondas de gradiente térmico produzem camadas refundidas e ou solidificadas na superfície usinada com uma zona termicamente afetada (ZTA) abaixo da camada refundida. Leves bolhas e crateras aparecem com aumento do nível de energia e a espessura da camada refundida com o aumento da taxa de remoção de material. Mesmo quando a eletroerosão é muito bem controlada sempre uma pequena camada refundida é encontrada. A Fig. 3.12 ilustra os efeitos que podem ser encontrados.

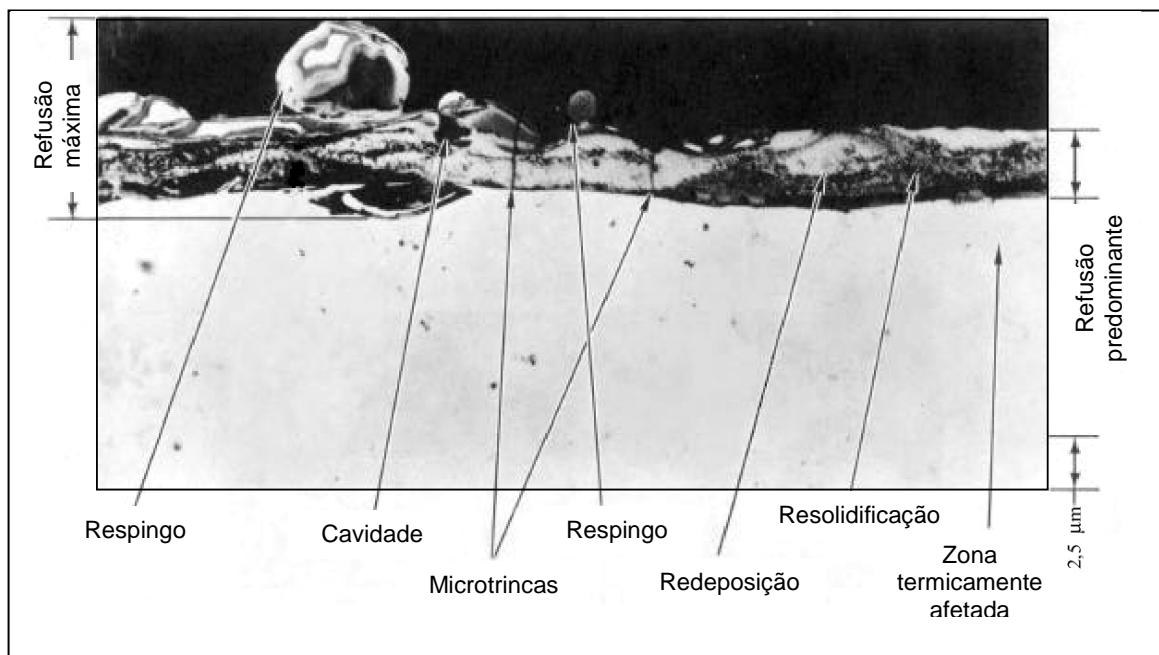


Figura 3.12 – Superfície refundida com os tipos de alterações e suas descrições. Material: Liga Hastelloy. 300X (MDC - 1980)

Algumas considerações podem ser descritas com relação a integridade da superfície usinada pelos processos de remoção térmica:

- a) A textura da superfície é composta por uma matriz aleatória de crateras e bolhas, às vezes com microtrincas após a usinagem em regime desbaste;
- b) As condições metalúrgicas das peças a serem usinadas e a seleção dos parâmetros de usinagem são importantes variáveis para geração de superfícies com qualidade;
- c) A profundidade das zonas termicamente afetadas é aproximadamente proporcional à energia aplicada no processo de usinagem. Essas zonas são sempre presentes em algum nível;

d) Na zona termicamente afetada ocorrem variações na dureza e substancial tensão residual na superfície usinada;

e) A profundidade da zona termicamente afetada abaixo da camada refundida de material é aproximadamente igual a profundidade máxima da camada refundida. Na eletroerosão, camadas refundidas podem ser controladas e são sempre poucos micrometros de espessura;

f) A resistência à fadiga é severamente reduzida pela ocorrência da zona termicamente afetada;

g) Superfícies produzidas pelos processos de remoção térmica de material possuem alto “stress” residual na zona termicamente afetada, e devem ter um pós-tratamento de remoção de tal zona;

h) As microtrincas na seção de corte das peças usinadas pelos processos de remoção térmica, podem ser um valioso indício da sensibilidade térmica relativa destes materiais.

Na presente dissertação foi realizado um estudo na integridade da superfície do metal duro, usinado pelo processo de remoção térmica de eletroerosão por fio (WEDM), com diferentes variáveis do processo, obtendo respostas conforme descritas no capítulo 5.

3.9 Processo WEDM para metal duro

A usinagem do carbeto de tungstênio ou metal duro representa atualmente um grande desafio para a indústria. Com exceção de ferramentas de corte de diamante, a eletroerosão é o único método econômico de usinar este material, mas também nele existem dificuldades embutidas, como pôr exemplo uma camada superficial refundida e microtrincas na peça.

De 1973 a 1979, oito membros do Comitê Técnico Científico do CIRP (Cooperative Research on Spark-Erosion Machining), realizaram um projeto cooperativo de pesquisa em usinabilidade do metal duro por eletroerosão, onde foi investigado especialmente o comportamento de microtrincas em vários tipos de metais duros, sobre várias condições de usinagem.

Depois dos experimentos preliminares, realizado na Universidade de Achem, o comitê, em 1974, testou a usinagem do metal duro tipo GT20, com fios de cobre e cobre tungstênio. Foi mostrado que as microtrincas formadas pela usinagem por

eletroerosão, geram maior influência na diminuição da vida de ferramentas de metal duro em relação as outras danificações que possam vir a ocorrer.

Segundo Heuvelman (1980), a integridade da superfície usinada é essencial para a vida de punções e matrizes de ferramentas. Um problema com a usinagem dos carbeto de tungstênio é a ocorrência de microtrincas. Entretanto o dimensional é de difícil realização e com tempo de descarga t_e abaixo de 5 μm , não são encontradas fortes evidências destas. Nos gumes das geometrias geradas, observam-se, entre as microtrincas, superfícies com aspecto de degradação.

Apesar dos parâmetros do gerador, especificamente os relacionados à descarga elétrica, exercerem forte influência para um bom resultado na integridade da superfície usinada, outros fatores devem ser ressaltados. Segundo Maggi et al (1991), existem quatro tipos de problemas que ocorrem na WEDM do metal duro. São eles:

- Influência térmica;
- Influência eletroquímica;
- Corrosão da superfície “pitting”.

No problema da influência térmica, a geração de calor da descarga elétrica durante a fusão e remoção de material, tem diferentes efeitos sobre a superfície usinada do metal duro, são eles:

- Lavagem e remoção da fase metálica;
- Destruição da coesão entre os carbeto;
- Tensões residuais;
- Microtrincas.

Ferramentas com superfícies danificadas apresentam uma vida acentuadamente menor em comparação com ferramentas fabricadas adequadamente, devido á diminuição da sua tenacidade. As influências térmicas negativas devem ser minimizadas por meio de cortes em regime de acabamento, com energias de descargas W_e gradativamente menor. Deste modo, a zona termicamente afetada (ZTA) ocorrido no primeiro corte, ou desbaste, pode ser completamente removida.

A influência eletroquímica durante o processo de eletroerosão é gerada pela formação de um campo de tensão elétrico entre a peça (ânodo) e o fio (cátodo), que

é acentuado ao longo das duas extremidades da peça na entrada e saída do fio (gume). Este campo de tensão gera uma reação eletroquímica que provoca uma rápida e acentuada perda de Co que é reduzido em cátions solúveis em água, conforme mostra a representação esquemática da Fig. 3.13.

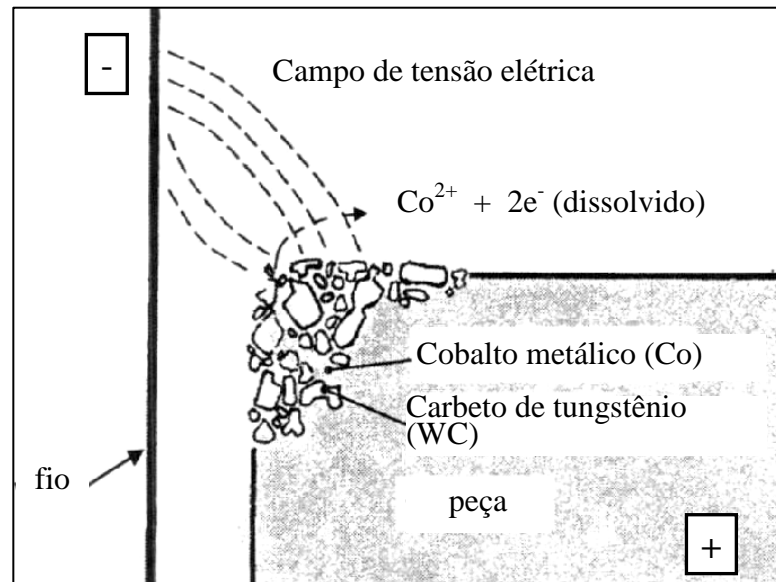


Figura 3.13 – Representação esquemática do campo de tensão elétrica entre fio e peça. Reação eletroquímica com arraste da fase metálica do metal duro. (Maggi et al - 1991)

No caso da aplicação do metal duro para estampagem, os gumes da ferramenta desgastam-se rapidamente com a ocorrência deste fenômeno, por isso, antes que a ferramenta possa ser utilizada, estas zonas devem ser eliminadas por retificação com profundidade de 10 a 15 μm .

Com grande frequência a superfície que sofre a WEDM apresenta corrosão por “pitting”, ou seja, pequenas crateras na superfície ou imediatamente abaixo desta. No caso de acentuadas influências térmicas, estas podem estar recobertas por uma camada metálica retemperada. A superfície poderá assim parecer perfeita, mas assim que são expostas a esforços e atrito, as crateras anteriormente recobertas aparecem imediatamente. A corrosão provoca também uma lavagem (arraste) da fase metálica, liberando cobalto no dielétrico, conseqüentemente maior risco de ocorrência de microtrincas durante o uso da ferramenta.

Segundo Lämmle (1997), as danificações na superfície do metal duro, podem ser caracterizadas conforme mostram as Fig. 3.14a e Fig. 3.14b.

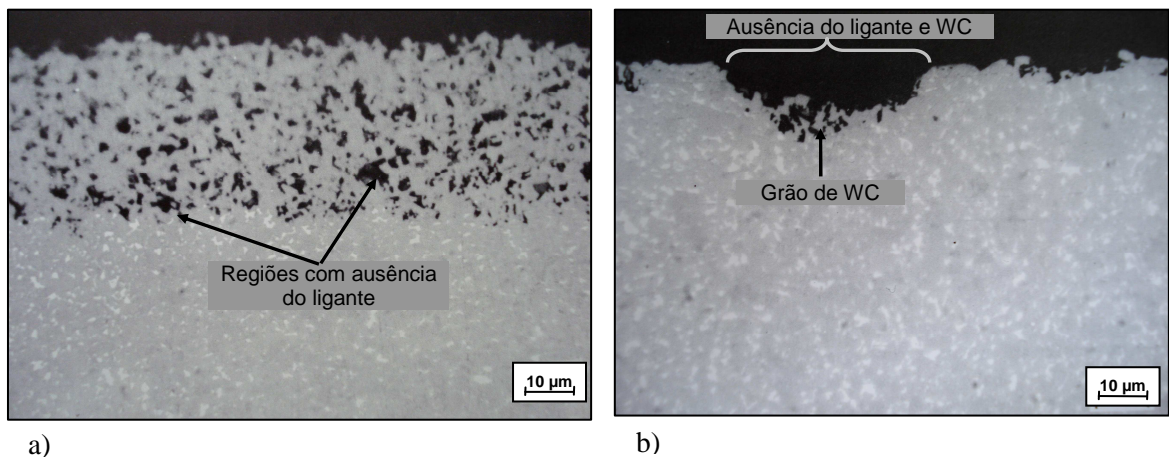


Fig. 3.14(a) Detalhe da danificação causada pelo dielétrico da eletroerosão em região não eletroerosionada. (b) Danificações causadas pelo dielétrico da eletroerosão em região eletroerosionada. Lämmle (1997).

As Fig. 3.14a e Fig. 3.14b mostram os defeitos de “pitting” ou corrosão. Tal danificação causada pela falta de ligante do metal duro, ocorre devido ao fenômeno eletroquímico do Co com o dielétrico do processo de WEDM. A Fig.3.14a mostra uma danificação constante ao longo da superfície onde não ocorre a usinagem, com profundidade de aproximadamente 40 µm. Nota-se na região danificada (pontos pretos) a falta do ligante paralelamente à superfície. Restando nesta, apenas os grãos de WC (região cinza) não suportados. Este tipo de danificação ocorre com dielétricos com excesso de detritos e com alta condutividade.

A Fig. 3.14b mostra danificações de aproximadamente 20 µm em superfície eletroerosionada, causadas através do dielétrico, seu fluxo e oscilação de resíduos da usinagem neste, envolvendo assim os parâmetros de tecnologia da WEDM.

Segundo Löttgen (1998), ao longo dos últimos anos os fabricantes de máquinas têm desenvolvido as tabelas de tecnologia das máquinas de EDM baseando-se nas condições descritas na norma VDI 3402. Entende-se por "tabelas de tecnologia" os parâmetros ótimos recomendados para a usinagem, os quais estão inseridos no sistema computacional das máquinas de EDM. A taxa de corte V_w e a rugosidade obtida descritos nestas tabelas de tecnologia, são alcançados sob condições ótimas de testes de usinagem e com a utilização de materiais padronizados. Na prática industrial cotidiana estas condições ótimas de usinagem são relativamente raras, como é o caso da fabricação de matrizes de estampagem em diferentes classes de metal duro. Além disso, em muitos casos, os materiais utilizados nas ferramentarias não são aqueles adotados pelos fabricantes para a

elaboração das tabelas de tecnologia. Desta forma, os consumidores enfrentam sérios problemas no momento de estabelecer parâmetros adequados de usinagem para o alcance de resultados econômicos do processo.

Com a revisão realizada, pode-se então retirar teorias, procedimentos e variáveis de maior influência no processo de eletroerosão por fio (WEDM) do metal duro, com objetivo de aumentar a qualidade da superfície usinada e produtividade na fabricação de ferramentas de estampagem. Portanto, pode-se afirmar que o capítulo 4 mostrado a seguir, foi realizado com embasamento suficiente que justifica a validade e objetividade dos seus experimentos.

4. MÉTODOS EXPERIMENTAIS E MATERIAIS

O presente capítulo tem como objetivo principal a apresentação da metodologia e materiais utilizados para esta dissertação, como também mostrar os parâmetros fixos e variáveis que possam ser modificados em outras pesquisas, teses e experimentos. O objetivo é mostrar com clareza e propor uma avaliação dos principais parâmetros do processo de fabricação de ferramentas por WEDM, especificamente na fabricação de seus punções e matrizes de metal duro. Os experimentos realizados foram direcionados para melhorar e desenvolver a aplicação tecnológica deste processo em termos de qualidade e rendimento, através da diminuição de microtrincas e dissolução de Co para prolongar a vida das ferramentas e diminuição do tempo de usinagem.

A pesquisa em questão foca os resultados na estampagem de lâminas de motores elétricos, e foi realizada dentro de uma ferramentaria que fabrica tais ferramentas. Pode-se então, com tal experiência, descrever os principais fatores de influência para um bom rendimento geral do processo de fabricação de lâminas para motores elétricos. Tais fatores foram resumidamente descritos na Fig. 4.1.

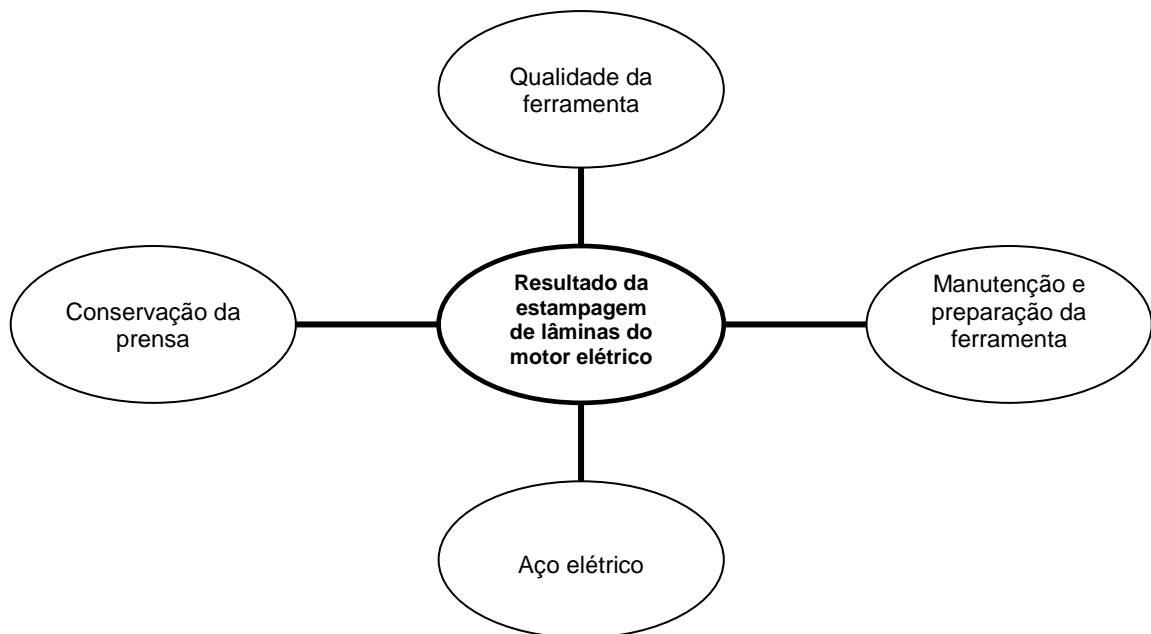


Figura 4.1 – Representação esquemática dos principais fatores de influência na estampagem de lâminas para motores elétricos.

O presente trabalho é um estudo da qualidade da ferramenta de estampagem, correlacionando com os resultados gerados pelo processo de WEDM

em metal duro. Dentre os diversos processos de fabricação de punções e matrizes de metal duro, como exemplo a retificação com rebolos de diamantes, a WEDM é o processo que gera maior influência na vida destes componentes.

Embasados pelas referências estudadas, foram selecionados os principais fatores de influência no desgaste e quebras destes componentes. A Fig. 4.2 mostra uma representação esquemática de tais fatores na fabricação de uma ferramenta.

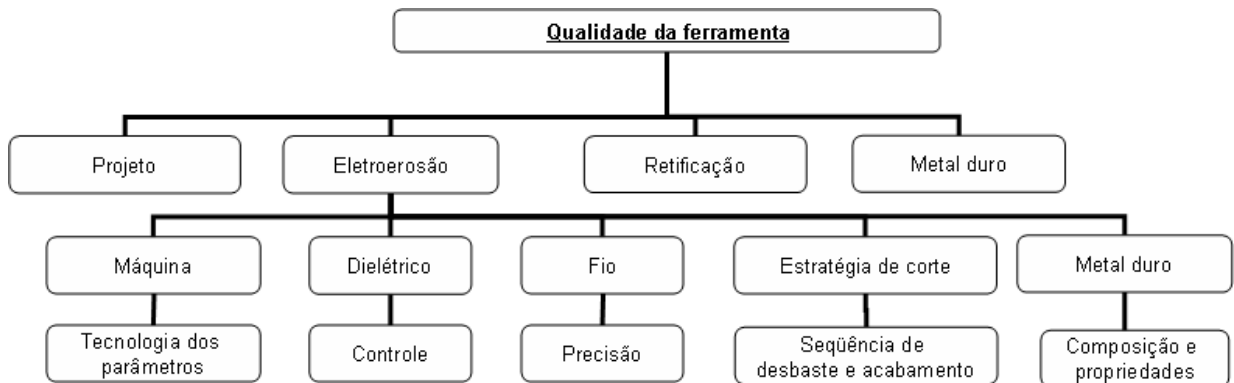


Figura 4.2 – Representação esquemática dos fatores de influência na fabricação de punções e matrizes de metal duro para ferramentas de estampagem de lâminas de motores elétricos.

Objetivou-se analisar de forma abrangente e significativa os parâmetros relacionados à WEDM, buscando o aprimoramento do processo para gerar resultados positivos na vida da ferramenta de estampagem. A Tab. 4.1 mostra resumidamente as avaliações e experimentos realizados na presente dissertação.

Tabela 4.1 - Resumo dos experimentos realizados relacionados com os fatores de influência.

Fator de influência	Metodologia das avaliações realizadas
Tecnologia dos parâmetros da máquina	Estudo dos códigos do gerador e seus parâmetros. Análise da tabela de tecnologia e definição da estratégia de usinagem.
Controle do dielétrico	. Experimento de tempo em banho no dielétrico e seus parâmetros. Avaliação do tipo de dielétrico do processo
Metal duro	Avaliação entre classes de metais duros.
Fio (eletrodo)	Avaliação de qualidade entre fios de latão extra-duro.
Estratégia de corte. Seqüência e regimes aplicados (desbaste e acabamentos)	Avaliação entre os passes de usinagem.
	Variação das etapas ou regime de usinagem.

Conforme mostra a Tab. 4.1, depois de estudado os principais parâmetros sugeridos na tabela de tecnologia da máquina de WEDM, resultantes dos requisitos de projeto (exatidão geométrica, grau de acabamento e altura da peça usinada), foram realizadas análises na integridade da superfície usinada do metal duro para propor uma condição mais adequada do dielétrico.

Igualmente como realizado com o dielétrico, foram avaliadas classes de metais duros com objetivo de estabelecer um destes com melhor resultado de integridade da superfície usinada (microtrincas e corrosão) e para obter também maiores informações entre as diferentes composições e propriedades dos metais duros que mais atuam no mercado de fabricação de ferramentas de estampagem de lâminas elétricas.

Na seqüência, foi avaliado o eletrodo ferramenta, no caso o fio, entre uma das principais composições usadas para WEDM em metal duro e uma classe de fio semelhante, com composição ligeiramente diferente e fabricação nacional, com objetivo também de estudar as condições e efeitos deste fator na WEDM em metal duro.

Após estas avaliações, foi então realizada uma análise detalhada da seqüência de usinagem do processo de WEDM, com as condições controladas de dielétrico, tipo de metal duro e tipo de fio já estabelecidos. Nesta etapa da pesquisa verificou-se a possibilidade de diminuição de microtrincas e corrosão da superfície usinada. Como também um possível aumento de rendimento do processo com a análise dos resultados gerados no regime de desbaste e entre os acabamentos (seqüência de usinagem) da WEDM. Em complemento a esta etapa da pesquisa, realizou-se a variação da quantidade de regimes de acabamentos propostos pela tabela de tecnologia padrão da máquina.

Cada etapa do estudo realizado nesta dissertação é descrita em detalhes nos próximos subcapítulos.

4.1 Plano e geometria de amostragem

Com objetivo de facilitar a preparação laboratorial das amostras (corte para embutimento) e realizar a seqüência experimental simulando a fabricação de elementos de corte para ferramentas. Estipulou-se a geometria das amostras

semelhante à de punções, devido os mesmos ser fabricados em grande quantidade para estampagem de lâminas elétricas se comparado com matrizes. A Fig. 4.3 mostra a representação esquemática das amostras.

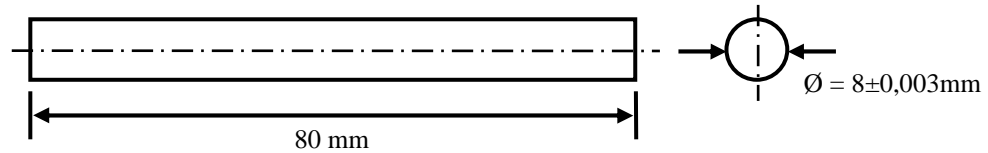


Figura 4.3 – Geometria das amostras.

Como trata-se de uma experimentação demorada e análise dificultosa devido a alta dureza do metal duro, foi analisado uma amostra para cada experimento. Ressalta-se que o processo de usinagem em máquinas modernas de WEDM é um processo com excelente repetibilidade de resultados, devido à exatidão de movimentação através de guias, encoders dos eixos da máquina e controle dos servomotores via CNC.

4.2 Preparação das amostras

A preparação das amostras foi realizada conforme mostra esquema de cortes da Fig. 4.4.

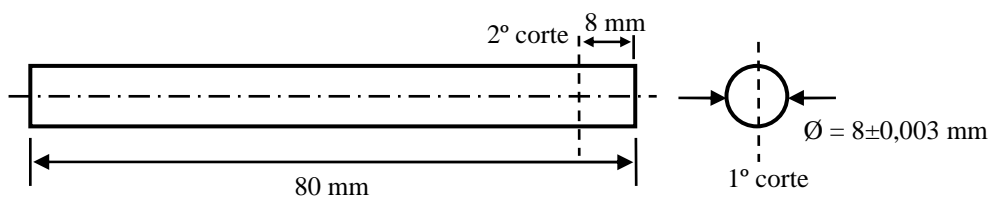


Figura 4.4 – Esquema de cortes realizados na preparação das amostras.

Os dois cortes realizados para retirada da porção de material à ser embutido, foram definidos primeiramente com o critério dos mesmos serem através de duas superfícies onde houve usinagem. O 1º corte foi executado no meio na seção transversal da amostra, garantindo que duas superfícies usinadas sejam expostas para análise microscópica. O 2º corte foi executado 8 mm abaixo de uma das extremidades da amostra. Este último foi definido com base na altura de utilização que punções e matrizes são reafiados até seu fim de vida.

Os dois cortes foram realizados com rebolo de diamante do fabricante Tecnotools código 14A1-D151RC75BW com dimensões de 125x1,2x20 mm. A máquina usada para o corte foi uma afiadora CNC do fabricante Jungner, modelo US460 com rotação igual a 2600 rpm e avanço de 8 mm/min com refrigeração constante e em abundância. Este procedimento foi realizado, ao invés do corte por WEDM, para garantia da mínima influência do dielétrico sobre a superfície usinada das amostras.

As metalografias das amostras foram analisadas via microscopia ótica, em microscópio modelo Axioskop 2 MAT, HAL100 da Zeiss, com ampliação de 1000 vezes na superfície do topo e nas laterais, conforme mostra representação esquemática da Fig. 4.5.

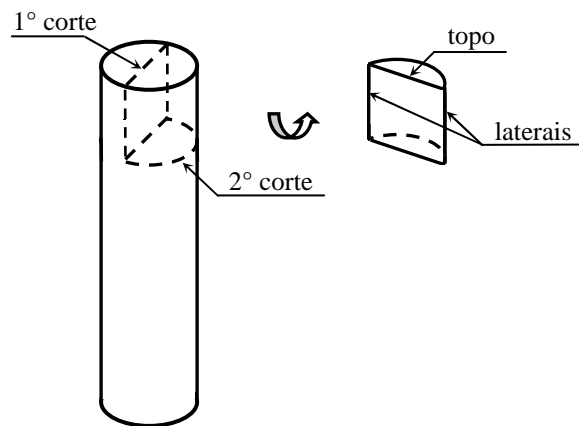


Figura 4.5 – Esquema das superfícies analisadas nas amostras.

Destaque-se que a metodologia de medição das danificações, foi realizada conforme padrões estabelecidos pelo laboratório de materiais da indústria onde foram realizados os experimentos. Sendo esta uma medição real da danificação encontrada e não por comparação da escala. Portanto, nas metalografias apresentadas no próximo capítulo, foi simbolizado a pior danificação encontrada com o seu valor real.

Na preparação das amostras realizou-se, em politriz comum, lixamento de desbaste com lixa tipo MD Piano-600, pré-acabamento com lixa tipo MD-Alegro juntamente com suspensão de diamante de 9 μm tipo Dia-Pro. Como acabamento final, realizou-se o polimento com lixa MD-Nap e suspensão de diamante de 1 μm , modelo Dia-pro também. Sendo todas as lixas e suspensões do fabricante Struers.

Foi utilizado o método de embutimento em baquelite comum. Na preparação das amostras, tomou-se o cuidado para não ocorrer o arredondamento do metal duro embutido, pois trata-se de um material com dureza muito mais elevada que o baquelite, e isso compromete a análise da superfície usinada (erro comum nas análises de materiais de alta dureza).

4.3A máquina de eletroerosão por fio e seus parâmetros

A máquina usada nos experimentos foi fabricada em 2004, modelo Excellence, do fabricante Agie, com cinco eixos de movimentação (X,Y,Z, U e V) e tipo submersa. A mesma possui campo de trabalho igual a 750 x 550 x 250 mm, definido pelo tamanho da mesa de fixação da peça. Curso dos eixos X, Y e Z igual a 350 x 250 x 256 mm respectivamente e inclinação dos eixos U e V igual a 30°. Segundo Agie (2003), esta máquina fornece rugosidade R_a mínima de 0,1 μm e exatidão geométrica de 0,002 mm.

Os parâmetros usados no gerador deste tipo de máquinas, não são totalmente acessíveis. Ou seja, nem todos os parâmetros do gerador que influenciam no processo de usinagem, são passíveis de variação e ajuste na prática industrial. Para o presente trabalho foi contatado, via e-mail, o fabricante da máquina na tentativa de liberação dos parâmetros usados. O fabricante relatou não ser possível a medição dos mesmos via a instalação de equipamentos de medição de corrente e voltagem, como por exemplo, um osciloscópio. Isto deve-se à existência de propriedade industrial registrada para tais parâmetros. Portanto, do ponto de vista acadêmico e para realização de pesquisas nas universidades e empresas, esta máquina de WEDM, igualmente a maioria das máquinas usada nas indústrias e ferramentarias, é limitada para um desenvolvimento abrangente nos parâmetros do seu gerador.

Tais parâmetros de usinagem são previamente selecionados através dos requisitos de projeto estabelecidos pela aplicação das peças usinadas e também em função dos resultados de trabalho desejados. Estes parâmetros de entrada do processo são descritos como:

- Tolerância geométrica requerida da peça;
- Rugosidade R_a desejada;
- Altura da peça a ser usinada;

- Material da peça;
- Fio (eletrodo) usado.

Sendo o foco de aplicação do presente trabalho, foram aplicadas a geometria e suas tolerâncias semelhantes aos da fabricação de elementos cortantes de uma ferramenta de estampagem para lâminas de motores elétricos. A Tab.4.2 mostra estes parâmetros de entrada.

Tabela 4.2 – Parâmetros de entrada do processo.

Dados	Valor
Tolerância geométrica	$\pm 3 \mu\text{m}$
Rugosidade máxima R_a	$0,15 \mu\text{m}$
Altura da peça	70 mm
Material da peça (%em peso)	Metal duro 12% WC - 88% Co com adição de Cr+ Re
Fio eletrodo	Latão

A partir dos valores mostrados na Tab. 4.2, foi selecionada a tabela de tecnologia mais adequada para atender os parâmetros de entrada desejados. Os parâmetros desta tabela de tecnologia, desenvolvidos segundo Agie (2003), são descritos em detalhes e comparados com os parâmetros de entrada no capítulo 5.

4.4 Os parâmetros do dielétrico

Com objetivo de pré-estabelecer condições ótimas do dielétrico usado no processo de WEDM em metal duro, primeiramente foram estudados os efeitos da aplicação de controles e tipo neste parâmetro de processo sobre a superfície usinada das amostras. Desta forma, foram confrontadas as seguintes condições:

- Controle da condutividade elétrica: Sem controle versus máximo de $10 \mu\text{S/cm}$ no desbaste;
- Controle do pH: Sem controle versus controle entre $7 \pm 0,5$ (para o desbaste e acabamentos);
- Tipo: Água normal versus água destilada.

Salvo o primeiro experimento onde buscou-se a maximização dos efeitos do dielétrico sobre o metal duro, realizou-se a secagem das amostras a 110°C por 30

minutos em forno elétrico, com objetivo do dielétrico (água) não influenciar nos resultados de integridade da superfície usinada das amostras. Neste primeiro experimento foi selecionado um tipo de metal duro (metal duro 1) a partir de um bloco bruto ou “virgem” e submerso em água fornecida para o consumo normal pela fornecedora Águas de Joinville, ou seja, água potável. Os efeitos gerados na camada limite, foram analisados após 70 horas que a amostra submersa neste tipo de dielétrico. Em seguida, realizou-se o experimento com controles no pH e condutividade do dielétrico com amostra em submersa por 20 horas. Para finalizar esta etapa, foi realizada uma amostra com os parâmetros otimizados de controles, secagem e tipo de dielétrico (água destilada). Os resultados deste experimento são discutidos juntamente com os resultados da avaliação de classes de metais duros, no subcapítulo 5.3.

A destilação da água foi realizada em equipamento do fabricante Quimis, tipo Pilsen, modelo Q341-25. A condutividade foi controlada via condutivímetro modelo Seven Go – SG3 do fabricante Metter Toledo, onde foi estipulado um valor máximo de 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ durante o processo usinagem. O pH foi mantido próximo ao valor neutro (igual a 7) com variação de $\pm 0,5$. para tal, foi usado uma solução de amina do fabricante Dorf Ketal. Controlado com medidor de pH modelo MP120 pH Meter CH-8603 do fabricante Metter Toledo também. Ambos os parâmetros do dielétrico (pH e condutividade), foram medidos no início da usinagem no tanque de decantação da máquina, que possui água deionizada e filtrada.

Desta forma, foram pré-estabelecidos em função dos resultados encontrados na superfície usinada das amostras, o tipo e as condições mais adequadas do dielétrico para realização dos experimentos posteriores.

4.5 Classes de metais duros usados para estampagem de lâminas elétricas

O presente trabalho também abrange outro importante parâmetro de influência no processo de WEDM, o material a ser usinado. No caso estudado, o metal duro usado para ferramentas de estampagem. Existem diversas classes de metais duros, sendo que para cada um destes existe uma ou mais classes de metais duros oferecidos para aplicação na estampagem de lâminas de motores elétricos. Apesar destas variações, o metal duro usado neste processo de estampagem

geralmente varia em torno de sua composição principal de 10% de Co e 90% de WC até 15% de Co e 85% de WC (% em peso).

Depois de estabelecido a tabela de tecnologia e realizado as otimizações no dielétrico utilizando o metal duro 1, foram analisadas a integridade da superfície usinada e a rugosidade R_a de mais quatro metais duros. O objetivo principal foi estabelecer um fabricante e sua classe, com menores danificações, menor rugosidade R_a e que não ofereça, por motivos de má qualidade da sua fabricação, por exemplo, algum tipo de influência negativa nos resultados da usinagem e conseqüentemente na estampagem. Optou-se por esta análise também para registrar os resultados na usinagem em diferentes metais duros usados para fabricação de ferramentas de estampagem.

A Tab. 4.3 mostra algumas das principais propriedades dos metais duros avaliados aplicados na indústria de estampagem de motores e geradores elétricos.

Tabela 4.3 – Principais propriedades dos metais duros avaliados.

Metal duro	Composição (% em peso)	Norma ISO 513	Dureza (HV30)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à ruptura transversal (MPa)	Tamanho de grão de WC (μm)	Densidade (g/cm^3)
1	88 %WC 12 %Co+Cr+Re	K40	1380	600	3000	1,5 a 3,0	14,33
2	85 %WC 15 % Co	K45	1400	540	3900	1,0 a 2,0	13,95
3	88%WC 12 % Co	K40	1450	510	3360	1,0 a 2,0	14,30
4	84 %WC 16 % Ni	*	1430	585	2800	1,0 a 2,0	14,35
5	88,5%WC 11%Co+0,5%Ni	K40	1225	585	2640	3,0 a 5,0	14,35

*Não encontrado em referências.

Em pesquisa de benchmark pode-se constatar que as empresas nacionais optam por estas classes, portanto, podem ser considerados os mais usuais no mercado nacional e internacional de fabricação de ferramentas de estampagem de lâminas para motores elétricos. Sendo assim, os metais duros avaliados garantem um estudo realmente relacionado à atual prática industrial.

A partir do melhor resultado entre os metais duros avaliados e qualidade do dielétrico, foi dada continuidade nos experimentos de fio e parâmetros do gerador.

4.6 O fio eletrodo

Atualmente não existem muitos fabricantes de fio para o processo de WEDM. Os mais usuais são fornecedores europeus e asiáticos, como também o próprio fabricante de máquinas de eletroerosão. O fio pode ser considerado a ferramenta de corte deste processo de usinagem e como tal, possui elevado consumo. A utilização de fios nacionais nas ferramentarias e indústrias brasileiras está aumentando. Desta forma, estes estão atualmente competindo com os fornecedores estrangeiros que possuem maior tempo de atuação no mercado nacional.

Como trata-se de um importante parâmetro do processo de fabricação de ferramentas de metal duro por WEDM e é de merecimento uma avaliação na qualidade dos fios nacionais, foram avaliados um dos mais comuns usados nas ferramentarias brasileiras (importado) e um fio nacional de latão extra-duro com classe semelhante. Os tipos de fios analisados foram oferecidos pelos fornecedores com base experiência dos mesmos na aplicação da WEDM.

Os dois fios avaliados são da classe latão extra-duro, de diâmetro igual a 0,25mm e foram chamados por uma simbologia geral, conforme mostra a Tab. 4.4.

Tabela 4.4 – Composição dos fios avaliados.

Elemento	Elemento de liga (%)	
	Fio F1	Fio F2
Cu	64	65
Zn	36	35

A amostra F1 trata-se de um fio fabricado na Alemanha de grande renome comercial e a amostra de fio F2 de um fabricante brasileiro.

Os fios analisados apresentam resistência à tração de 900 N/mm², foram adquiridos em bobinas padrão de 16 kg e em carretéis tipo DIN200. Nesta avaliação foram utilizados parâmetros do dielétrico, procedimentos e metal duro pré-selecionados conforme resultados dos experimentos anteriores. O resultado do trabalho foi avaliado através da taxa de corte V_w e as características do processo

através da integridade da superfície usinada, exatidão geométrica das amostras e rugosidade R_a das mesmas.

Destaca-se que V_w pode sofrer grande influência pelo fio usado no processo de WEDM, que interage diretamente em um resultado econômico em termos de rendimento e consumo de fio. Este insumo da WEDM possui em sua composição principal o cobre, que sofre atualmente grande variação de preço e a cada dia com maior custo.

Para medição do tempo de usinagem foi usado o contador da máquina de eletroerosão, chamado pelo fabricante de “horímetro”, integrado no seu sistema CNC. Este inicia e finaliza a contagem do tempo durante a ocorrência de descargas elétricas, ou seja, apenas quando há remoção de material.

Para a medição da exatidão geométrica, foi usado um micrômetro de bancada, da marca Mitutoyo e incerteza de medição de 0,001 mm. Conforme Agie (2004), para verificação da exatidão geométrica gerada na peça usinada fornecida pela tabela de tecnologia selecionada, deve-se realizar sua medição em três pontos. Sendo uma em cada extremidade e uma no meio da amostra. Após, é necessário calcular a exatidão geométrica através da Eq. 4.1, chamado, segundo Agie (2004) de T_{km} :

$$T_{km} = \pm \frac{(\text{maior diferença dimensional} - \text{menor diferença dimensional})}{2} \quad (4.1)$$

Na Eq. 4.1, a “maior e menor diferença dimensional” é obtida através dos valores das medições das três seções (extremidades e meio) do perfil da amostra em relação à medida nominal desejada. Assemelhoram-se as amostras com o mesmo perfil dos punções usados em ferramentas de estampagem para motores elétricos, pois com o aumento da medida nominal da amostra usinada o valor T_{km} também aumenta.

Para medição da rugosidade R_a , foi usado um equipamento digital de contato fabricado pela Taylor Robinson modelo Talysurf 120.

4.7 Variação dos parâmetros do gerador

Na presente dissertação, foram analisados todos os detalhes da tabela de tecnologia dos parâmetros do gerador da máquina em cada regime de usinagem usado para os experimentos. Dentre estes regimes de operação do gerador, existe sempre uma quantidade de material a ser usinada até que se atinja a medida final da peça acabada. Esta quantidade de material, conforme Agie (2004), é descrito como “ofs” entre usinagens, que é soma do raio do fio e fenda de trabalho, conhecido usualmente como “offset”. Além deste parâmetro de processo, e a partir do estudo realizado de todos os parâmetros estabelecidos pela tabela de tecnologia, foram realizados os seguintes experimentos:

- Avaliação entre os “passes” de usinagem;
- Variação das etapas de acabamento.

Estes experimentos são detalhados nos subcapítulos seguintes (4.7.1 e 4.7.2).

4.8 Avaliação entre os “passes” de usinagem - análise entre regimes de desbaste e acabamentos

Para um maior entendimento e análise detalhada dos efeitos da usinagem pela WEDM, foi analisado a integridade da superfície do metal duro em cada regime de usinagem separadamente, usando as condições já otimizadas descritas nos subcapítulos 4.3 a 4.6. Para tal, foram interrompidas via comando CNC da máquina, cada etapa do regime de usinagem, ou seja, foi retirado uma amostra após o regime de desbaste e também uma após o término de cada um dos seis regimes de acabamento em sequência. A Tab. 4.5 descreve as amostras obtidas em cada etapa entre os regimes de usinagem.

Tabela 4.5 – Amostragem em função dos regimes de usinagem.

Amostra	Etapas	Regime de usinagem
01	1°	Desbaste
02	2°	Desbaste + 1 acabamento
03	3°	Desbaste + 2 acabamentos
04	4°	Desbaste + 3 acabamentos
05	5°	Desbaste + 4 acabamentos
06	6°	Desbaste + 5 acabamentos
07	7°	Desbaste + 6 acabamentos

Conforme mostra a Tab. 4.5, existem sete etapas até que seja atingido o resultado desejado de exatidão geométrica e rugosidade R_a . Entretanto, pode-se afirmar que apesar do resultado da 7ª etapa (após o sexto acabamento) ser a etapa que atinge o resultado desejado conforme a tabela de tecnologia selecionada, as etapas anteriores são importantes e passíveis de uma análise criteriosa. Estas etapas podem influenciar no tempo de usinagem total da peça como também gerar defeitos na superfície usinada, e estes não serem totalmente retirados até o último acabamento.

Para melhor descrever o sistema de regimes de usinagem, a Fig. 4.5 mostra um esquema representativo de como é a relação ofs (sobremetal), entre os regimes de desbaste e acabamentos do processo padrão de usinagem.

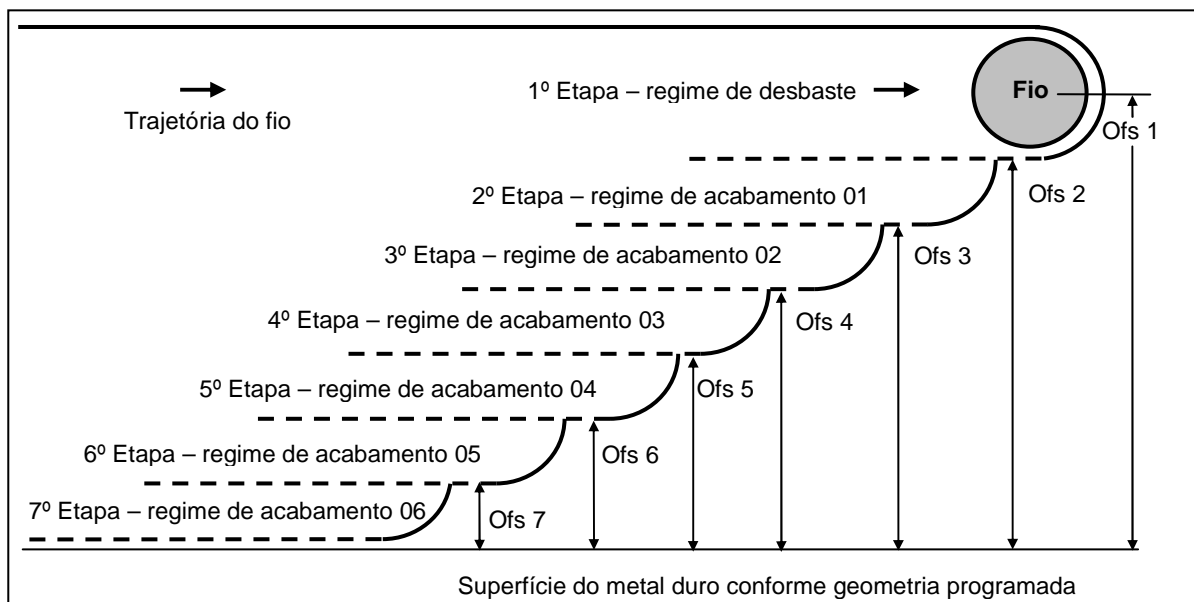


Figura 4.6 – Esquema representativo das etapas de usinagem dadas pela tabela de tecnologia.

Com o uso da metodologia de análise exposta, pode-se entender o processo de WEDM em metal duro em detalhes para obter informações sobre o resultado de trabalho (taxa de corte V_w) e características do processo, como exemplo a quantidade de microtrincas e sua permanência ou retirada até o resultado final da usinagem (peça acabada).

4.9 Variação dos regimes de usinagem no acabamento

Após análise da integridade da superfície usinada entre as etapas de desbaste e acabamentos, foi realizado um experimento com a diminuição de uma das etapas de acabamento. Este teve como objetivo principal tornar o processo de usinagem mais econômico, pois com um “passe” a menos para o acabamento da peça, o processo torna-se mais rápido e por consequência gera um aumento na produtividade de fabricação de ferramentas de estampagem, como também verificar possíveis melhorias na qualidade do resultado gerado, como exemplo diminuição de microtrincas que possam vir a permanecer na etapa de maior energia aplicada conforme descrito por Maggi et al (1991). Para tal experimento, foi criado a partir dos mesmos dados da tabela de tecnologia padrão usada, uma nova tecnologia codificada com a diminuição de uma etapa. Nos experimentos, foram realizadas a medição de tempo de usinagem pelo relógio digital da máquina, medições da exatidão geométrica e rugosidade R_a e análise metalográfica da superfície usinada da amostra. Esta última, de fundamental importância na comparação com o estado padrão gerado pela quantidade de regimes de acabamento aplicados.

Conforme descrito no próximo capítulo, foi analisada a possibilidade de retirada do penúltimo acabamento, ou seja, a retirada da 6ª Etapa – regime de acabamento 05. Definida através dos resultados do estudo da tabela de tecnologia dos parâmetros da máquina e análise metalográfica da superfície usinada, nesta etapa ocorre um alto tempo de usinagem e a 4ª etapa não gera um alto grau de danificações na superfície usinada das amostras.

Com os métodos e materiais descritos, foi estabelecida uma metodologia para avaliar melhorias em termos de qualidade da usinagem por WEDM do metal duro e seu rendimento. No presente trabalho, primeiramente foram estratificados os parâmetros de análise do processo de WEDM. Em seguida foram realizadas otimizações no dielétrico do processo, avaliando classes metais duros, fios e parâmetros do gerador (tabela de tecnologia).

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Esta etapa da presente dissertação mostra os resultados obtidos nos experimentos realizados e discussões dos fenômenos resultantes da variação dos parâmetros de processo estipulados. Todos foram baseados e confrontados com as referências pesquisadas, com objetivo de avaliação e aprimoramento da exatidão geométrica, rendimento e integridade da superfície do metal duro após o processo WEDM, conforme procedimentos e materiais previamente citados.

5.1 A tabela de tecnologia e seus parâmetros

A Tab. 5.1 mostra os parâmetros recomendados pelo fabricante da máquina, Agie (2003), ou seja, a tabela de tecnologia, selecionados a partir dos resultados desejados da usinagem (parâmetros de entrada) descritos na Tab. 4.2 do subcapítulo 4.3.

Tabela 5.1 – Parâmetros fornecidos pela tabela de tecnologia. (Agie - 2003).

Código da tabela	ehmcca25nnn025b015070
Fio	Modelo Cobra Cut, Ø=0,25 mm
Material (% em peso)	85%WC+15%Co
T_{km} [±µm]	2,5
T_e [µm]	2 a 6
R_a [µm]	0,15
Altura da peça [mm]:	70

Na primeira linha da Tab. 5.1, segundo Agie (2003), é fornecido o código que é utilizado para localização dos parâmetros de processo via CNC da máquina.

Nota-se na segunda linha da tabela de tecnologia, que o metal duro padrão usado para seleção dos parâmetros de usinagem, possui composição de 15% de Co e 85% de WC, sendo diferente do parâmetro de entrada pré-estipulado como 12% de Co e 88% de WC com adição de Cr e Re. Ressalta-se que este parâmetro não pode ser mudado, pois é estabelecido pelo tipo de processo de estampagem de lâminas aplicado. Mesmo desconsiderando a adição de Cr e Re por serem

percentuais baixos da liga metálica, existe grande diferença no balanço percentual de WC e Co do metal duro. Portanto a tabela de tecnologia não possui o parâmetro de entrada, tipo de metal duro, compatível com o usado para estampagem de lâminas de motores elétricos do caso pesquisado.

Na seqüência, pode-se avaliar que o fio recomendado pela tabela de tecnologia da máquina também não é compatível com o parâmetro de entrada. Conforme mostra a Tab. 5.1, o fio é o modelo Cobra Cut-A, vendido pelo próprio fabricante da máquina, com resistência a tração de 900 Mpa, composição de 63%Cu+37%Zn e revestimento de zinco. Fabricado pela Berkenhoff GmbH – Alemanha. Sendo o parâmetro de entrada (fio) com composição de 63%Cu+37%Zn (extra-duro) de mesma resistência a tração, mas sem revestimento de Zn. Pode-se observar então, igualmente como a classe de metal duro, que há diferenças entre o fio estabelecido pela tabela de tecnologia conforme Agie (2003) e o real usado no processo estudado.

Em contato com os fornecedores de fio Berkenhoff, Eroma EDM (2007), pode-se constatar que o fio modelo Cobra Cut-A possui custo elevado em comparação ao atual fio usado de mesma liga, mas sem revestimento de Zn. Esta variação de custo pode ser explicada pela adição de tal revestimento. E assim, pode-se através da realização de benchmark em ferramentarias e fornecedores de usinagem da região, constatar o pouco uso de fios com tal revestimento, apesar deste gerar maior taxa de corte V_w . Assim, considera-se que a tabela de tecnologia fornecida pelo fabricante como sendo a que atinge o resultado de usinagem desejado não é compatível com a realidade usada na indústria.

A Tab. 5.1 apresenta ainda os parâmetros chamados de T_{km} e T_e , que são conforme Agie (2003) a exatidão geométrica de usinagem resultante na peça, ambos em micrometros. O T_{km} é uma média aritmética do dimensional do perfil da peça usinada, medidos na superfície inferior e superior. Este é correlacionado conforme norma VDI3402 como contorno de corte médio S_m . O parâmetro T_e é considerado por Agie (2003) como conicidade da peça usinada, medida através da máxima diferença dimensional dos perfis superior e inferior.

Estes parâmetros, fornecidos pela tabela de tecnologia, possuem valores aproximados de T_{km} ou S_m igual a $\pm 2,5 \mu m$ e T_e (conicidade) variando de 2 a 6 μm . Conforme descrito na Tab. 4.2, a exatidão geométrica desejada é de $\pm 3 \mu m$. Sendo assim, pode-se observar que este parâmetro está dentro da especificação de

tolerância desejada e o parâmetro T_e ultrapassa no máximo 1 μm , erro que pode ser considerado aceitável na fabricação de peças de ferramentas de estampagem.

Outro importante parâmetro de entrada é a rugosidade R_a que deseja-se obter na peça usinada. A tabela de tecnologia fornece este parâmetro como sendo no máximo igual a 0,15 μm . Assim, como também no caso dos valores de exatidão geométrica (S_m e conicidade), este parâmetro está de acordo com os parâmetros de entrada.

O próximo parâmetro de seleção da tabela de tecnologia da máquina é a altura da peça. Trata-se de um dimensional de entrada conforme a altura da peça que se deseja usinar (parâmetro de entrada). Na presente dissertação foi utilizado, conforme explicado no capítulo 4, um dimensional de altura equivalente à dos punções para ferramentas de estampagem de lâminas elétricas. No caso estudado igual a 70 mm. Sendo este valor igualmente fornecido pela tabela de tecnologia. Assim, verifica-se que este parâmetro de entrada é compatível com o real parâmetro desejado.

Desta forma, pode-se confrontar os parâmetros de entrada na Tab. 4.2 com os parâmetros fornecidos na tabela de tecnologia segundo Agie (2003), descritos na Tab. 5.1, com objetivo de maior embasamento para realização dos experimentos da presente dissertação.

5.2 Condições do dielétrico usado no processo WEDM em metal duro

Explicada no capítulo 4, esta etapa dos experimentos avalia os efeitos das condições de pH, condutividade elétrica e elementos químicos do mesmo (qualidade), sobre a integridade da superfície usinada do metal duro e pré-seleciona as condições ótimas do dielétrico para continuação dos experimentos. Para tal, foi analisada uma amostra após 70 horas submerso em água potável usada como dielétrico do processo de WEDM estudado. O resultado da análise metalográfica do topo da amostra pode ser visto na Fig. 5.1.

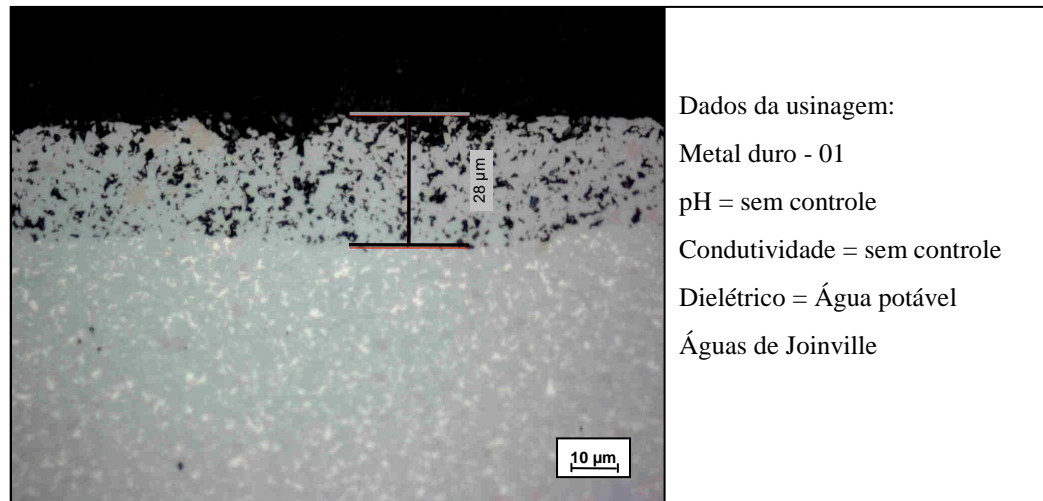


Figura 5.1 – Metalografia do topo de amostra submersa por 70 horas em água potável. Metal duro (88%WC+12%Co+Cr e Re).

Observa-se nesta região da amostra, que não sofre os efeitos térmicos gerados pela descarga elétrica, a presença de danificações na superfície do metal duro. Nota-se que toda sua a superfície sofreu dissolução de Co com profundidade constante de 28 μm ao longo do seu topo, verificada como sendo a região com coloração preta, ou seja, região sem Co, restando apenas os grãos de WC (região com coloração cinza), que para a classe do metal duro avaliado (88%WC+12%Co+Cr e Re) varia de 1,5 a 3,0 μm . Esta região danificada pode ser considerada fragilizada para o uso na estampagem de lâminas, por não ter mais o ligante de Co que fornece a tenacidade para suportar as tensões e impacto envolvido neste processo de fabricação.

Desta forma, foi possível a confirmação que somente os efeitos da água usada como dielétrico no processo de eletroerosão, não possuindo nenhum tipo de controle de pH e condutividade elétrica e nenhum pré-tratamento, agredem a superfície do metal duro através da reação eletroquímica da água com o Co. Vale ressaltar que o dielétrico em questão foi apenas submetido ao processo de filtragem e deionização usual do processo de WEDM.

Este experimento confirma os estudos realizados por Lämmle (1995) e Maggi et al (1991), que descrevem esta danificação como corrosão provocada pela água usada como dielétrico no processo WEDM do metal duro.

Em seguida, foi realizado um experimento com as condições do dielétrico controladas de pH e sua condutividade. Após a usinagem, ainda foi aplicado a secagem das amostras usinadas, conforme procedimentos descritos no capítulo 4.

Destaca-se que para um melhor custo benefício na usinagem de punções e matrizes de metal duro, realiza-se este processo a partir de blocos deste material, onde retira-se em um só setup de máquina várias peças. Sendo assim, as primeiras peças permanecem submersas no dielétrico um considerável período. Como simulação desta prática industrial, neste experimento optou-se por realizar a seqüência de usinagem completa da amostra e deixá-la submersa no dielétrico por 20 horas. Entretanto, este período estipulado deve ser avaliado em função da quantidade de peças usinadas pelo processo de WEDM.

A Fig. 5.2 e Fig. 5.3 mostram os resultados obtidos na análise metalográfica do topo e na superfície usinada (lateral) das amostras.

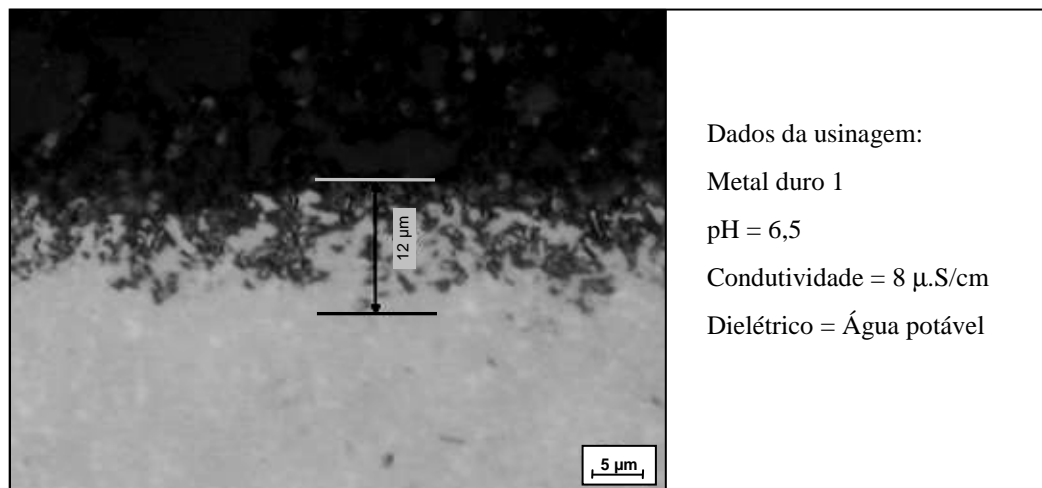


Figura 5.2 – Metalografia do topo da amostra usinada submersa durante 20 horas em água potável e controle do dielétrico.

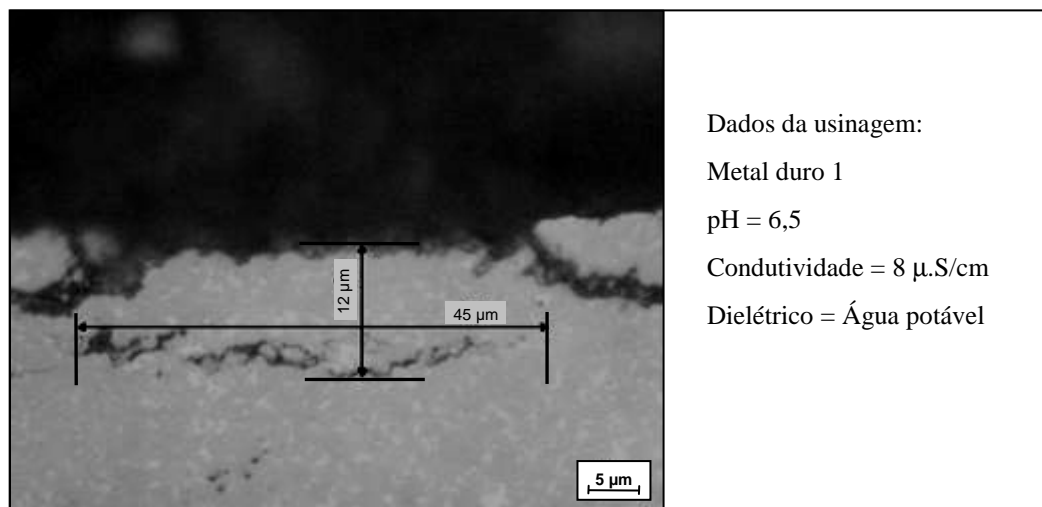


Figura 5.3 – Metalografia da lateral usinada da amostra submersa durante 20 horas em água potável.

A partir das análises metalográficas realizadas, pode-se observar que mesmo com os parâmetros de pH e condutividade do dielétrico controlados, ainda ocorre dissolução de Co no topo do metal duro com as mesmas características observadas na Fig. 5.1. Entretanto, o valor de 12 μm encontrado diminuiu drasticamente se comparado com o resultado encontrado na Fig. 5.1. Desta forma pode-se confirmar que o controle do pH e a condutividade do dielétrico influenciam positivamente na integridade da superfície do metal duro na diminuição do fenômeno de dissolução de Co ou corrosão, conforme Maggi et al (1991). Constatou-se também que a integridade da superfície usinada (lateral) sofre influência dos parâmetros de controle do dielétrico. Como mostra a Fig. 5.3, foram observadas danificações em forma de microtrincas paralelas à superfície em uma profundidade de 12 μm de profundidade, 45 μm de comprimento e em conjunto com partes do metal duro em fase de deslocamento do seu substrato. Pode-se relacionar que punções e matrizes com tais danificações são inadequados para o uso em ferramentas de estampagem, pois sua vida será reduzida devido ao aparecimento de rebarbas precoces no produto estampado e necessidade de reafiações antecipadas.

Observa-se então, que as condições de pH e condutividade do dielétrico são parâmetros predominantes para um bom resultado de usinagem tanto no topo como na lateral usinada do metal duro. Este fenômeno pode ser explicado, conforme Maggi et al (1991), pela eletrólise entre o Co e os íons da água (dielétrico) e pelo campo de tensão gerado entre o fio e a peça durante a descarga elétrica. Portanto, com a aplicação dos controles no dielétrico estabelecidos, obtém-se no processo de WEDM do metal duro, significativa melhoria na integridade da superfície do metal duro.

Deve-se registrar que na prática de engenharia pode-se aplicar conceitos de manufatura para que esse efeito negativo possa ser minimizado. Segundo Lämmle (1995), tão importante como os outros parâmetros de processo da WEDM, é a estratégia de usinagem. Esta pode ser definida de tal forma a minimizar tal efeito. Para isso, uma boa estratégia, formulada via programa CNC da máquina, é a de realizar um corte de separação na peça logo após seu último regime de acabamento e retirá-la do tanque da máquina. Minimizando assim o tempo que a peça permanece submersa.

A maioria dos fabricantes de ferramentas de estampagem que utilizam o processo WEDM em metal duro, não pratica esse conceito numa seqüência de

usinagem de várias peças, como exemplo em punções de ranhuras do estator que possuem mesmo perfil e são em grandes quantidades. Costuma-se usinar o primeiro punção e deixá-lo pronto, fixo no bloco através de uma porção de material não usinado que uni o punção e o bloco de metal duro. Em seguida inicia-se a usinagem do próximo punção onde realiza-se a mesma estratégia de usiná-lo até que o último regime de acabamento seja finalizado e assim por diante. Após que todos os punções estejam prontos faz-se um único corte nas uniões deixadas de cada punção para retirá-los do bloco. Sendo assim, o primeiro punção usinado permanece pronto, com todos os regimes de acabamento aplicados, submerso no dielétrico por um grande tempo de usinagem.

Esta estratégia é mais usual por gerar poucas interrupções do processo para retirada de peças da máquina, minimizando assim o tempo de usinagem e favorecendo o rendimento. Já em termos de influência do dielétrico sobre a superfície usinada do metal duro (qualidade), é prejudicial. Em termos de qualidade, uma boa estratégia de usinagem é a de aplicar o regime de desbaste primeiramente para todas as peças, em seguida, o primeiro acabamento (etapa 01) também para todas, igualmente para o segundo acabamento e assim por diante. Ou seja, cada regime regime de usinagem na mesma seqüência para todos os punções. Esta estratégia garante que o primeiro punção usinado permaneça no dielétrico apenas o tempo de usinagem até a finalização do último regime de acabamento do último punção da seqüência, sendo este tempo menor que se o primeiro punção permanecer acabado o tempo de todos os regimes para cada punção individualmente. E quanto menor for a seqüência de punções (quantidade) a ser usinado, menor ainda será o tempo de exposição da superfície do metal duro acabada com o dielétrico.

Na seqüência das análises concernentes aos efeitos do dielétrico sobre a camada limite do metal duro, foi realizado um experimento com a utilização de água destilada, para comparação da dissolução do ligante de Co com os experimentos até então realizados com água potável. O objetivo de usar água destilada é de eliminar elementos como o cálcio Ca e alumínio Al, prejudiciais na usinagem do metal duro por maior potencial de reação química com o Co. Entretanto o custo do processo de WEDM fica relativamente prejudicado, pois faz-se necessário um pós tratamento da água e por conseqüência tem-se um custo adicional para o processo de fabricação de punções e matrizes de metal duro.

Conforme resultados obtidos, este experimento foi realizado com os controles de pH variando entre 6,5 e 7,5, condutividade máximo de 10 $\mu\text{S/cm}$, metal duro 1 e o tempo das amostras submersas em água destilada foi apenas o tempo de usinagem das mesmas, em torno de uma hora. As Fig. 5.4 e Fig. 5.5 mostram os resultados obtidos para o topo e lateral usinada.

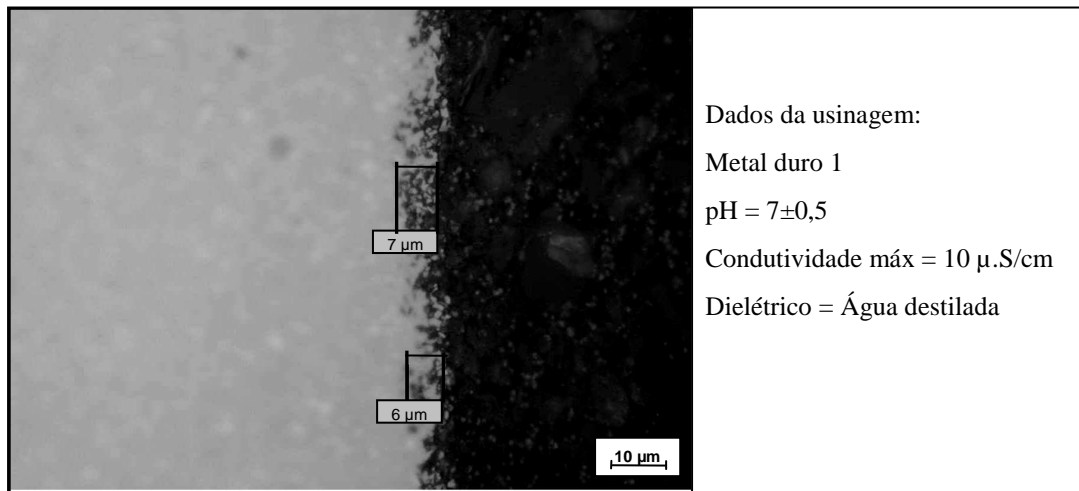


Figura 5.4 – Metalografia do topo de amostra usinada com controle de pH, condutividade e uso de água destilada como dielétrico. Amostra 1 - Metal duro (88%WC+12%Co+Cr+Re).

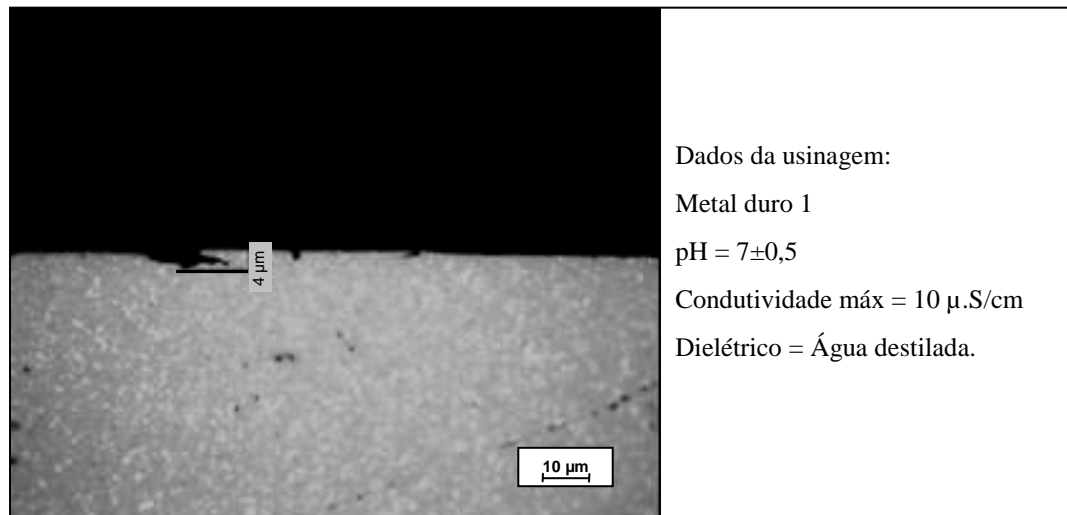


Figura 5.5 – Metalografia da lateral usinada da amostra 1. Metal duro (88%WC+12%Co com adição de Cr e Re).

Na Fig. 5.4, observa-se ainda a ocorrência de dissolução de Co paralela à superfície do metal duro em profundidade praticamente constante de 7 μm . Na lateral usinada, mostrado na Fig. 5.5, observa-se pouca ocorrência de microtrincas paralelas à superfície em profundidade máxima de 4 μm . Entretanto, pode-se observar uma diminuição significativa nas danificações encontradas no topo e lateral

usinada com a utilização de água destilada como dielétrico e tempo reduzido de usinagem. Os valores anteriormente encontrados de dissolução de Co de 12 μm no topo e 12 μm na lateral usinada, este último devido principalmente pela WEDM, reduziram para 7 μm e 4 μm respectivamente.

Um processo que foi usado para realização dos experimentos desta dissertação e também pode ser aplicado pelos usuários da WEDM em metal duro, é a secagem das peças logo após a sua usinagem. Desta maneira, garante-se que toda água na superfície usinada evapore forçadamente e não naturalmente com a temperatura ambiente, que pode levar um tempo prolongado e assim ocorrer maiores taxas de dissolução de Co na superfície do metal duro.

Com os controles e procedimentos otimizados conforme resultados obtidos nos experimentos relacionados ao dielétrico, foram realizados os experimentos seguintes mostrados nos subcapítulos 5.3, 5.4 e 5.5.

5.3 Avaliação da integridade da superfície usinada para diferentes classes de metais duros

Conforme mostrado na Fig. 4.2, o material a ser usinado no processo WEDM influencia no resultado de usinagem como também na qualidade da ferramenta de estampagem fabricada. Como descrito no capítulo 2, seleciona-se o metal duro a partir dos parâmetros do processo de estampagem, desta forma, as variações de composições e propriedades deste material estão ligadas pela sua qualidade e tecnologia de fabricação. Isto está relacionado então, ao “know how” entre as diversas indústrias fabricantes deste material.

Nesta etapa do presente trabalho, optou-se pela realização de experimentos de usinagem e análise metalográfica da superfície usinada para cinco tipos diferentes de metais duros, conforme mostrado na Tab. 4.2.

Os metais duros 1, 2, 3, 4 e 5 são fornecidos por fabricantes conceituados e de grande participação no mercado nacional e internacional. Além da qualidade de fabricação entre estes, existem as importantes diferenças de classes oferecidas para a o processo de estampagem de lâminas elétricas. Pode-se destacar estas diferenças pelas seguintes propriedades:

- Percentual em peso de Co e WC;
- Tamanho de grão de WC;
- Adição de Ni, Cr e Re para aumento da resistência à corrosão;

➤ Ligante de Co ou Ni.

Conforme resultados obtidos no subcapítulo 5.2, este experimento com diferentes metais duros foram realizados conforme parâmetros da tabela de tecnologia mostrados na Tab. 5.1, uso de água destilada como dielétrico, controles em seu pH variando entre 6,5 e 7,5 e sua condutividade máxima de 10 $\mu\text{S/cm}$. O tempo das amostras submersas em água, foi apenas o tempo de usinagem das mesmas.

Destaca-se os resultados encontrados no metal duro 1 com 88%WC+12%Co e adição de cromo (Cr) e rênio (Re) mostrados na Fig. 5.4 e Fig. 5.5. Nestas, pode-se verificar a ocorrência de dissolução de Co tanto no topo da amostra e na lateral usinada. Os valores das danificações causadas pela corrosão no topo do metal duro foram de 7 μm de profundidade. Já na lateral usinada da amostra, as danificações encontradas devido aos efeitos da WEDM foram de no máximo 4 μm .

Da mesma forma que o metal duro 1, foi realizado o mesmo experimento para o metal duro 2, que possui composição de 85%WC+15%Co e tamanho de grão de WC variando de 1 a 2 μm . Nota-se que este tipo de metal duro um maior percentual de Co em sua composição e menor tamanho de grão de WC.

Os resultados das análises metalográficas podem ser observados nas Fig. 5.6 e Fig. 5.7.

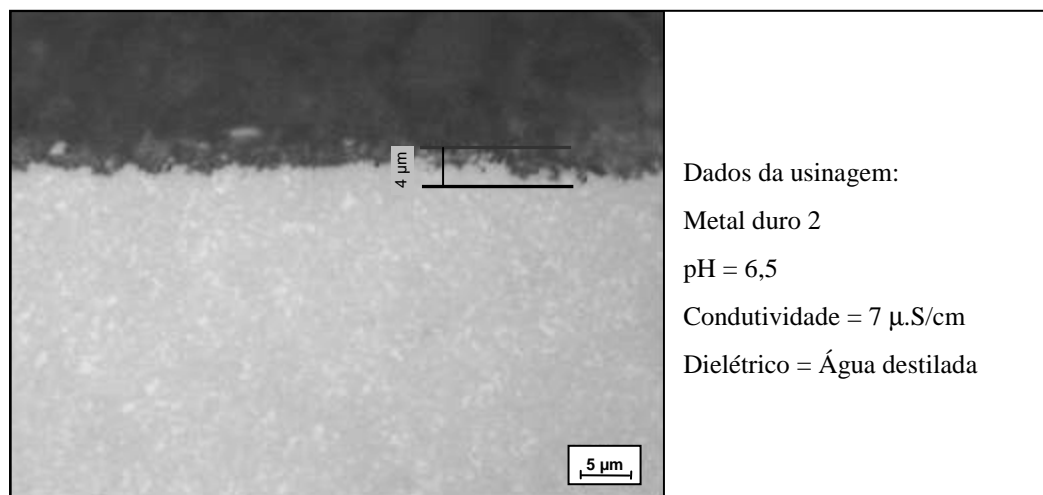


Figura 5.6 – Metalografia do topo da amostra 2. Metal duro (85%WC+15%Co).

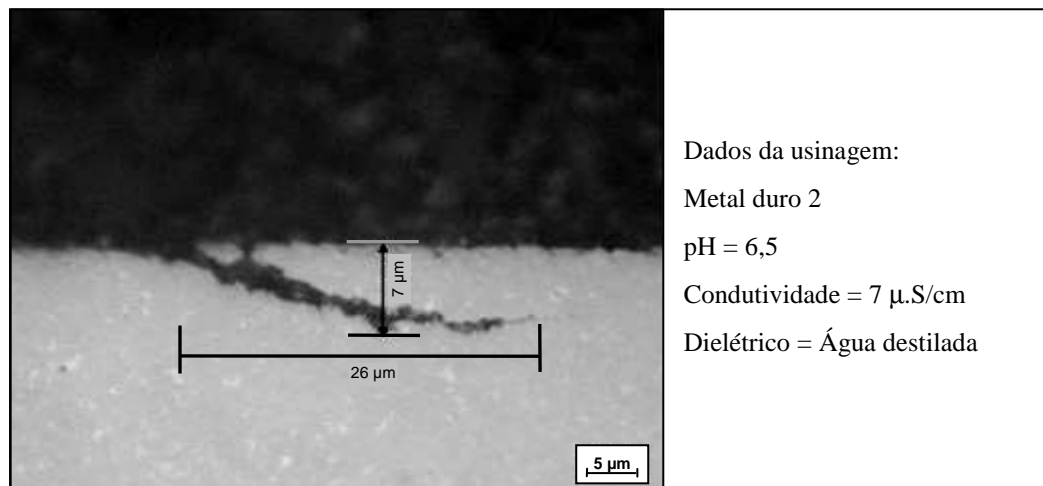


Figura 5.7 – Metalografia da lateral da amostra 2. Metal duro (85%WC+15%Co).

Observa-se na Fig. 5.6, que a superfície do topo do metal duro sofreu fraca dissolução de Co, onde o valor encontrado em forma de ondulações foi de 4 μm . Apesar do percentual de Co ser maior que a amostra número 1, esta menor danificação encontrada neste experimento pode ser justificada pelo menor tamanho de grão de WC. Ou seja, existe menor espaço entre os grãos de WC e por consequência menor quantidade de Co entre eles, assim, a dissolução do Co é menor por existir menor quantidade deste elemento em contato com a água.

Na Fig. 5.7, pode ser observado que também não houve dissolução de Co significativa, entretanto foi encontrado uma microtrinca de 7 μm de profundidade e 26 μm de comprimento. Este tipo de danificação na superfície usinada pode ser justificada pelos efeitos da descarga elétrica da WEDM, onde gera-se alto gradiente de tensões residuais devido a sua natureza térmica de remoção de material. Desta forma, pode-se constatar que mesmo para o metal duro com 85%WC+15%Co de mesma composição descrita pela tabela de tecnologia da máquina, apresenta fortemente um tipo de danificação na superfície usinada, no caso microtrincas.

Pode-se constatar então, que o metal duro 2 após o processo de WEDM com os parâmetros de usinagem selecionados, não é indicado para estampagem de lâminas para motores elétricas. Conforme descrito no capítulo 2, o processo de estampagem necessita de componentes de alta resistência à fadiga. Desta forma, a microtrinca encontrada pode reduzir a vida da ferramenta por gerar uma quebra prematura com a sua propagação. Outro inconveniente que pode ocorrer é a adesão do aço elétrico na sua abertura. Como também grande adesão de aço elétrico nesta

região, caso ocorra um deslocamento a partir da microtrinca encontrada. Todos estes efeitos gerados pela microtrinca, prejudicam a qualidade da lâmina elétrica estampada.

Em seguida, foi realizado o mesmo experimento para o metal duro 3. Os resultados podem ser observados na Fig. 5.8 e Fig. 5.9.

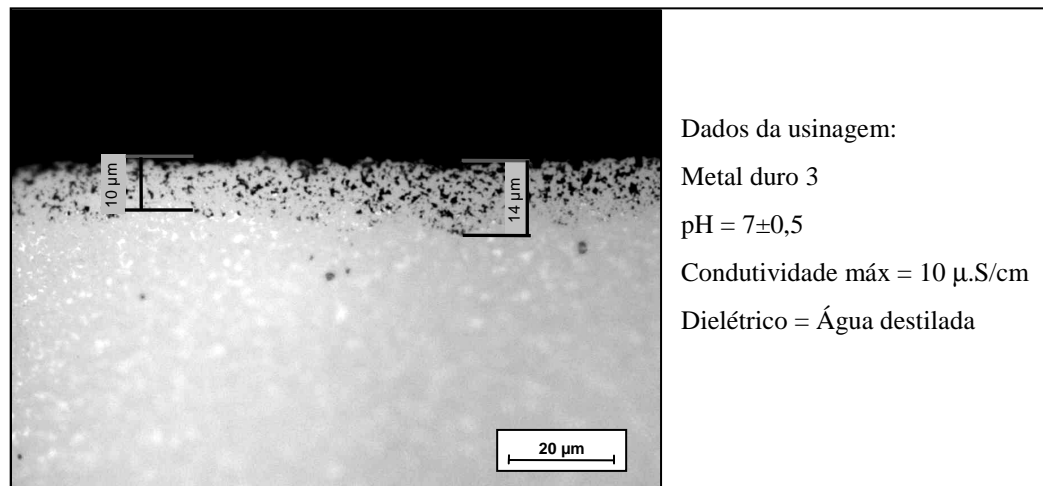


Figura 5.8 – Metalografia do topo da amostra 3. Metal duro (88%WC+12%Co).

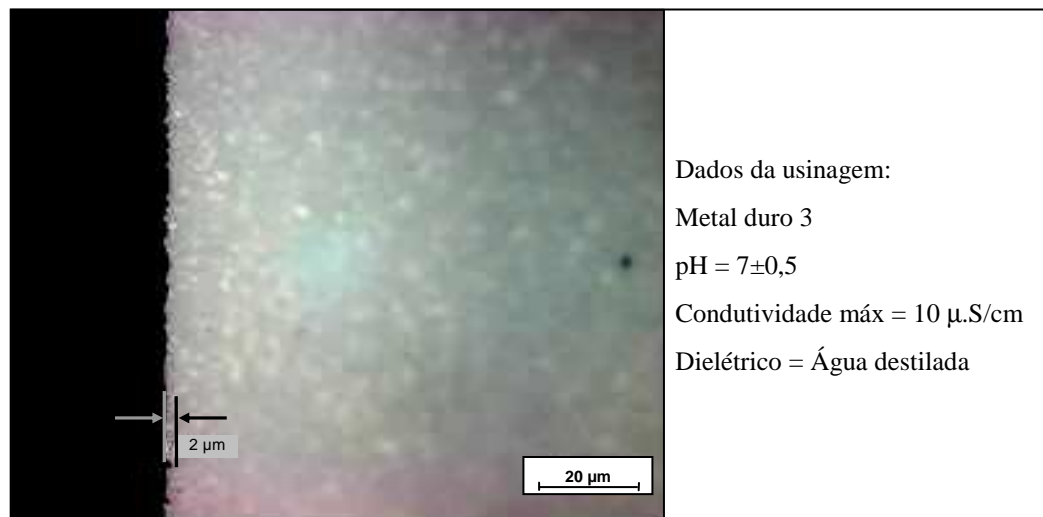


Figura 5.9 – Metalografia da lateral usinada da amostra 3. Metal duro (88%WC+12%Co).

Na Fig. 5.8, pode ser observada, com as mesmas características até então encontradas (perda de Co em regiões escuras), uma dissolução de Co significativa na superfície do metal duro com $14 \mu\text{m}$ de profundidade. Este tipo de danificação é maior se comparado com o metal duro 1, que possui mesmo tamanho de grão de WC e percentual de Co mas com adição de Cr e Re.

Conforme mostra a Fig. 5.9, na lateral usinada foram encontradas em regiões isoladas pequenas danificações de 2 μm de profundidade, que podem ser consideradas microtrincas. Sendo este um resultado muito bom em comparação aos resultados obtidos até então. Isto pode ser explicado pela boa qualidade de fabricação deste metal duro como também a adequação da classe deste metal duro com 88%WC+12%Co para os parâmetros fornecidos pela tabela de tecnologia da máquina, apesar desta classe ser diferente da estabelecida por tal tabela.

Como todas as amostras analisadas apresentaram dissolução de Co no topo, na sequência dos experimentos, foi selecionado um metal duro com adição de níquel (Ni) na sua composição em substituição ao Co usado como ligante. Este material (metal duro 4), foi selecionado por ter propriedades semelhantes aos usualmente aplicados para estampagem de lâminas de motores elétricos que utilizam Co na sua composição. A Fig. 5.10 e Fig. 5.11, mostram respectivamente os resultados de dissolução de Ni e microtrincas ao longo da superfície do topo e lateral usinada da amostra 4.

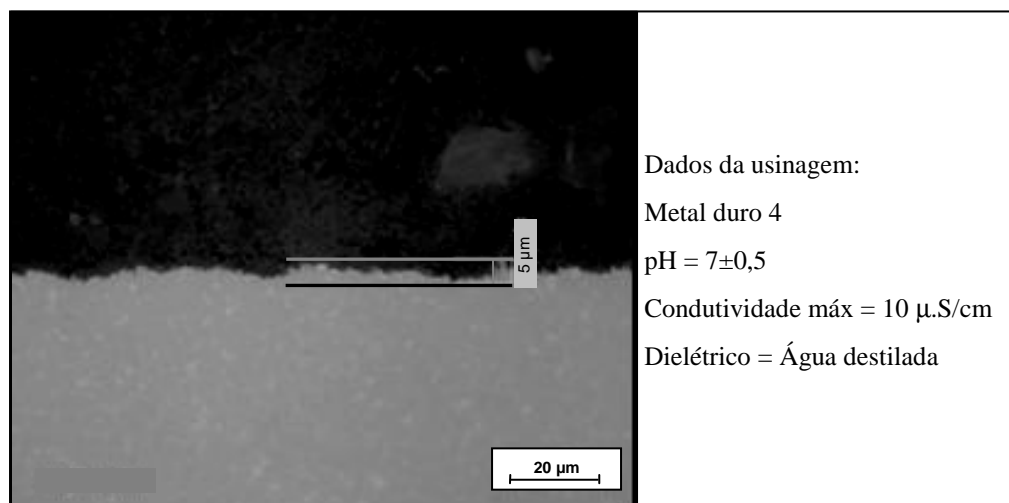


Figura 5.10 – Metalografia do topo da amostra 4. Metal duro (84%WC+16%Ni).

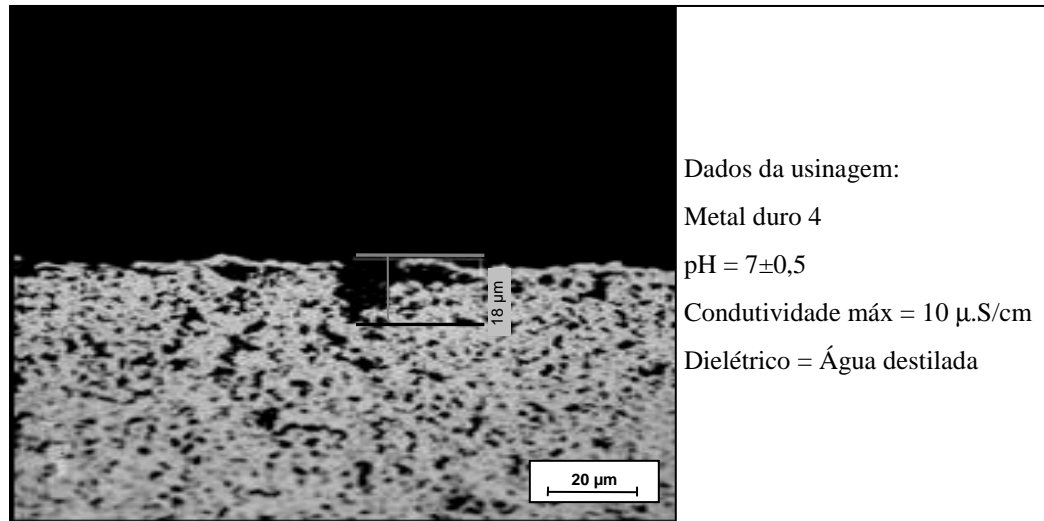


Figura 5.11 – Metalografia da lateral usinada da amostra 4. Metal duro (84%WC+16%Ni).

Pode-se observar na Fig. 5.10, que a amostra 4 sofreu pouca dissolução de Ni na superfície em contato apenas com o dielétrico (topo). Nesta região, observam-se apenas pequenas danificações e ondulações de no máximo 5 μm de profundidade com a ausência de Ni na superfície do metal duro. Entretanto, esta danificação não apresenta ser uma forte evidência de dissolução do seu ligante.

Comprova-se assim, a maior resistência do ligante de Ni em comparação aos metais duros com ligante de Co avaliados até então, pois as danificações médias encontradas nestes com ligante de Co são de 8 μm e com fortes evidências.

Entretanto, como mostra a Fig. 5.11, na lateral usinada pode-se observar a formação de microtrincas e deslocamento do ligante de Ni com profundidade de 18 μm , mostrando que este tipo de metal duro possui fragilidade ao processo de WEDM. Tal efeito negativo na superfície usinada pode ser explicado pela não compatibilidade dos parâmetros de descargas elétricas da máquina de eletroerosão. Foi observado também que não existe para este modelo de máquina, tecnologia integrada para usinagem deste tipo de metal duro, sendo neste experimento usado a tecnologia padrão, ou seja, para um metal duro com ligante de Co.

Outro detalhe importante observado que explica também este efeito negativo na integridade da superfície usinada, foi uma significativa concentração de Ni encontrada em duas amostras deste metal duro.

As Fig. 5.12a, Fig. 5.12b e Fig. 5.12c mostram este defeito observado, onde foram comparadas três regiões ao longo da área de 8x8 mm² da amostra analisada.

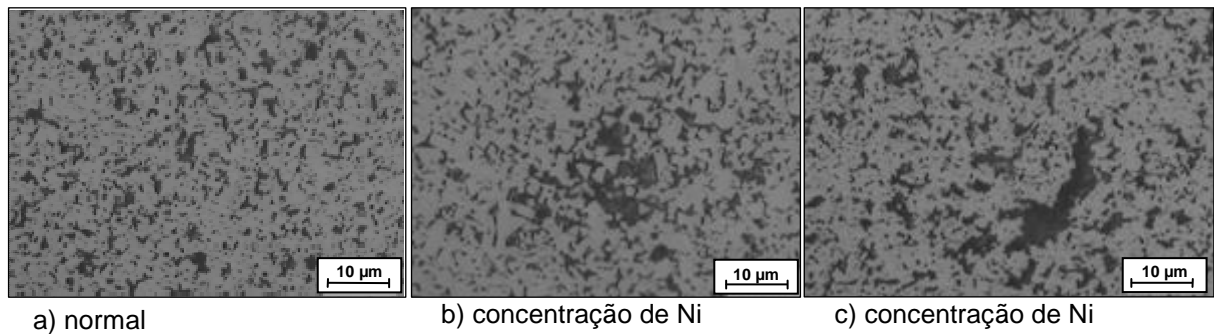


Figura 5.12 – Microestrutura da amostra 4. Metal duro com 84%WC+16%Ni. (a) Detalhe de uma região com distribuição normal de WC+Ni. (b) e (c) Concentrações de Ni encontradas.

Com as análises metalográficas mostradas na Fig. 5.12, pode-se verificar que existe má distribuição do ligante de Ni no metal duro avaliado, caracterizado por uma não homogeneidade na distribuição de WC (região clara) e Ni (região escura). Este defeito de fabricação torna-se então, um problema que agrava as danificações causadas pelo processo de eletroerosão, pois esta região pode ser facilmente danificada pelos efeitos térmicos da descarga elétrica devido a sua maior área e conseqüentemente maior exposição. Para complementar este raciocínio, destaca-se o problema das diferenças nas temperaturas de fusão dos elementos que formam os metais duros. O tungstênio W possui temperatura de fusão de 3422°C, o Co de 1495°C e o Ni de 1455°C. Sendo estas, muito menores que a temperatura envolvida no processo de eletroerosão.

O último metal duro avaliado, metal duro 5, foi selecionado a partir dos resultados até então encontrados. Este metal duro é fabricado com ligante de Co e adição de Ni, pretendendo assim, uma diminuição de microtrincas e dissolução do seu ligante. A Fig. 5.13 e Fig. 5.14 mostram os resultados encontrados na superfície do topo e lateral usinada da amostra 5, que possui 88,5%WC+11%Co+0,5%Ni.

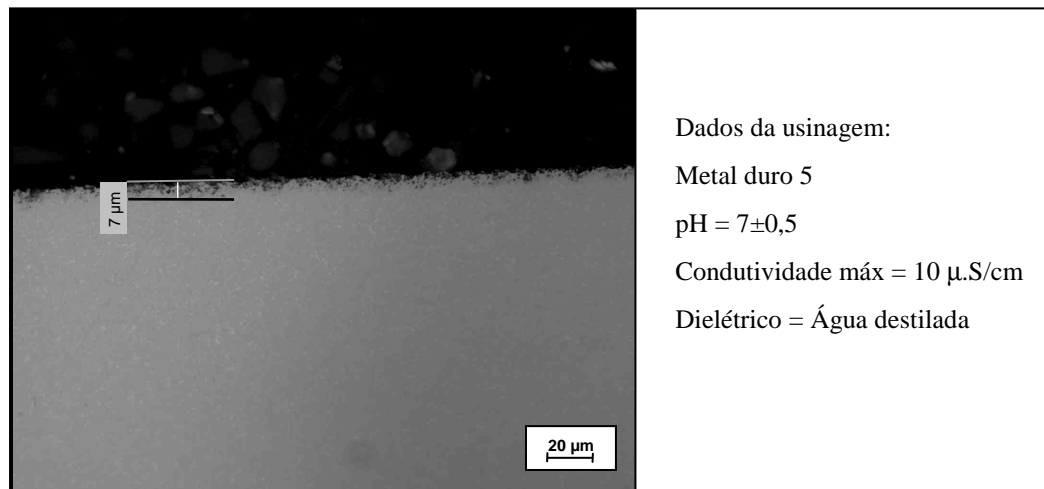


Figura 5.13 – Metalografia do topo da amostra 5. Metal duro (88,5%WC+11%Co+0,5%Ni).

Como pode-se observar na Fig. 5.13, o metal duro com adição de Ni possui dissolução do ligante de Co e Ni paralela à superfície, homogênea e com 7 μm de profundidade. Tal dissolução do ligante possui as mesmas características observadas na maioria dos metais duros até então avaliados, sendo esta em profundidade menor se comparada com a dissolução média ocorridas nas amostras com composição predominantemente de Co, que apresenta valor de 8 μm .

A Fig. 5.14, mostra a dissolução de Co encontrada na lateral usinada para o metal duro 5.

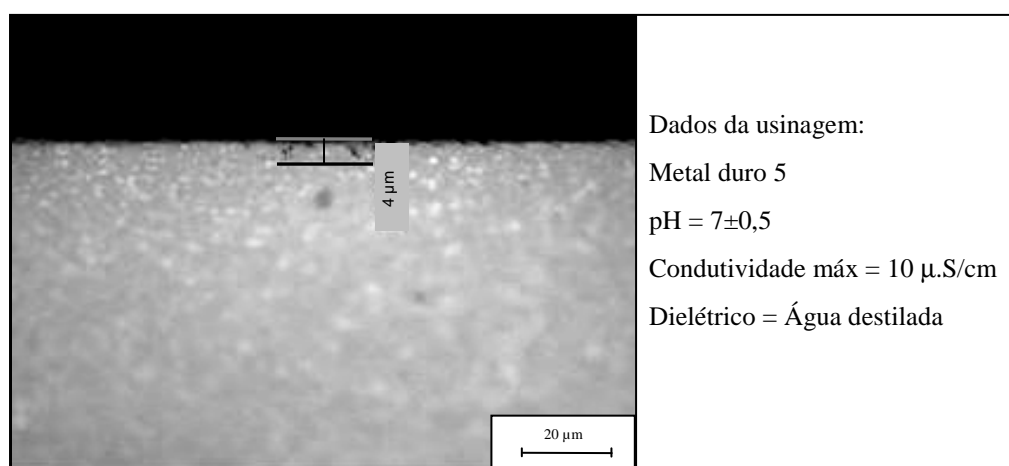


Figura 5.14 – Metalografia da lateral da amostra 5 - Metal duro (88,5%WC+11%Co+0,5%Ni).

Pode-se observar na Fig. 5.14, regiões pontuais com danificações em profundidade de 4 μm . Tais danificações podem ser consideradas microtrincas

geradas pela descarga elétrica em conjunto com a dissolução do ligante do metal duro gerada pelo dielétrico.

Pode-se avaliar então, que o metal duro 5 apresenta as menores danificações entre os metais duros avaliados, quando estas são analisadas com os valores encontrados no topo e lateral usinada em conjunto.

Após a avaliação das diferentes classes de metais duros, conforme resultados das análises metalográficas nas amostras 1 a 5, pode-se constatar que a classe do metal duro influencia na otimização de microtrincas e dissolução do seu ligante, quando este é submetido ao processo de WEDM.

A partir da menor danificação média encontrada entre o topo e lateral dos metais duros avaliados, foi selecionado a amostra 5 como o metal duro padrão para continuidade do estudo.

5.4 Análise da exatidão geométrica, taxa de corte e qualidade da superfície usinada entre fios de latão extra-duro

Nesta etapa da presente dissertação, foram avaliadas classes entre dois tipos de fios de latão, um nacional e outro importado. Ressaltando que o fio, aqui chamado de F1, foi o eletrodo usado nos experimentos de avaliação do dielétrico e classes de metal duro, desta forma, foi selecionado para comparação, apenas mais um tipo de fio, no caso o de fabricação nacional, chamado de F2.

Pode-se constatar que a classe de fio de latão com 63%Cu+37%Zn tipo extra-duro, é o mais usual no mercado nacional e no uso para usinagem de metal duro. Esta classe ainda possui menor custo se comparado aos fios revestidos com zinco (Zn), por exemplo.

Apesar de o presente trabalho focar a qualidade na fabricação de ferramentas de estampagem de lâminas para motores elétricos e o rendimento do processo de WEDM em metal duro, destaca-se, segundo Eroma EDM (2007), que a diferença de custo entre um fio revestido e um sem revestimento é de aproximadamente 45%. Já os fios nacionais, possuem menor custo de aquisição por não terem taxas de importação, tornando-se então, uma boa opção para um processo com menor custo de fabricação.

A Tab. 5.2 mostra os resultados obtidos nos experimentos realizados com o metal duro 5 de composição 88,5%WC+11%Co+0,5%Ni, uso da tabela de

tecnologia padrão, água destilada com controles de pH e condutividade de $7 \pm 0,5$ e máximo de $10 \mu\text{S/cm}$ respectivamente e variação apenas pelo tipo de fio (F1 e F2).

Tabela 5.2 – Tempo de usinagem das amostras em desbaste e acabamento para cada fio testado.

Tipo de fio	Tempo (min)							
	1º Etapa desbaste	2º Etapa acab.	3º Etapa acab.	4º Etapa acab.	5º Etapa acab.	6º Etapa acab.	7º Etapa acab.	Total
		01	02	03	04	05	06	
F1	29	22	12	10	16	12	16	117
F2	31	22	12	9	16	11	16	117

Como mostra a Tab. 5.2 os tempos totais de usinagem apresentaram o mesmo resultado para os dois tipos de fios. Pode-se verificar também que o maior tempo usinagem não é despendido no regime de desbaste, realizado em média de 30 min, mas sim nos regimes de acabamentos, que apresentam soma de 87 min. Ou seja, em média, 74% do tempo despendido para usinagem acontecem nos regimes de acabamentos.

A taxa de corte V_w pode ser calculada pelo produto da velocidade da peça v multiplicado pela sua altura h , conforme mostra a Eq. 5.1.

$$V_w = v \cdot h \quad (5.1)$$

O perímetro da amostra pode ser calculado conforme mostra a Eq. 5.2.

$$P = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (5.2)$$

Com o raio r das amostras igual a 8 mm, temos o perímetro P igual a 25,132 mm. Sendo assim, com os tempos obtidos na Tab. 5.2 e sabendo que a altura da amostra é igual a 70 mm, pode ser obtido a taxa de corte total e para cada regime de usinagem. Os resultados podem ser observados na Tab. 5.3.

Tabela 5.3 – Taxa de corte V_w das amostras para cada fio testado.

Regime de usinagem	V_w (mm ² /min)	
	F1	F2
1º Etapa – regime de desbaste	61	57
2º Etapa – regime de acabamento 01	80	80
3º Etapa – regime de acabamento 02	147	147
4º Etapa – regime de acabamento 03	176	195
5º Etapa – regime de acabamento 04	110	110
6º Etapa – regime de acabamento 05	147	160
7º Etapa – regime de acabamento 06	110	110
Total	15	15

Conforme mostra a Tab. 5.3, a taxa de corte é igual tanto para F1 quanto para fio F2, mostrando assim que o fio F2 não influencia no rendimento do processo WEDM em metal duro, conforme parâmetros dos experimentos realizados.

A variação encontrada em V_w nos regimes de acabamento entre os fios avaliados, pode ser explicada principalmente pela diferença entre suas composições. Outro fato é a qualidade da superfície do fio, onde segundo Eroma EDM (2007), se existir diferenças de qualidade pode ocorrer variação no tempo de início da descarga elétrica nos picos de rugosidade dos mesmos. Desta forma, foi realizada uma análise microscópica nos tipos de fios avaliados com objetivo de investigar a qualidade do seu processo de fabricação. A Fig. 5.15 e Fig. 5.16 mostram as micrografias realizadas.

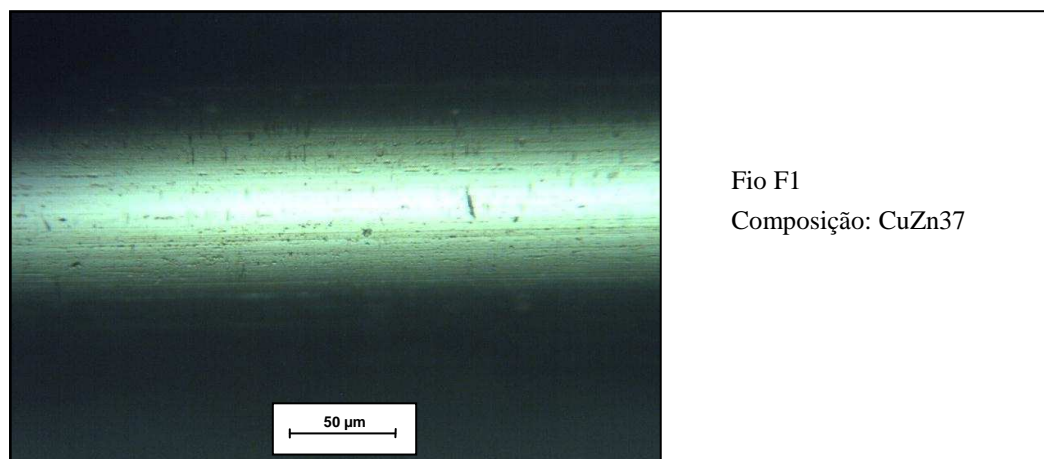


Figura 5.15 – Micrografia da superfície livre do fio F1.

A Fig. 5.15 revela uma superfície com deformações paralelas formadas ao longo dos 3 mm de varredura nesta microscopia. Tais deformações são provenientes do processo de trefilação aplicado na fabricação deste tipo de eletrodo ferramenta. Esta característica pode ser fortemente observada na amostra de fio F2, mostrada na Fig. 5.16.

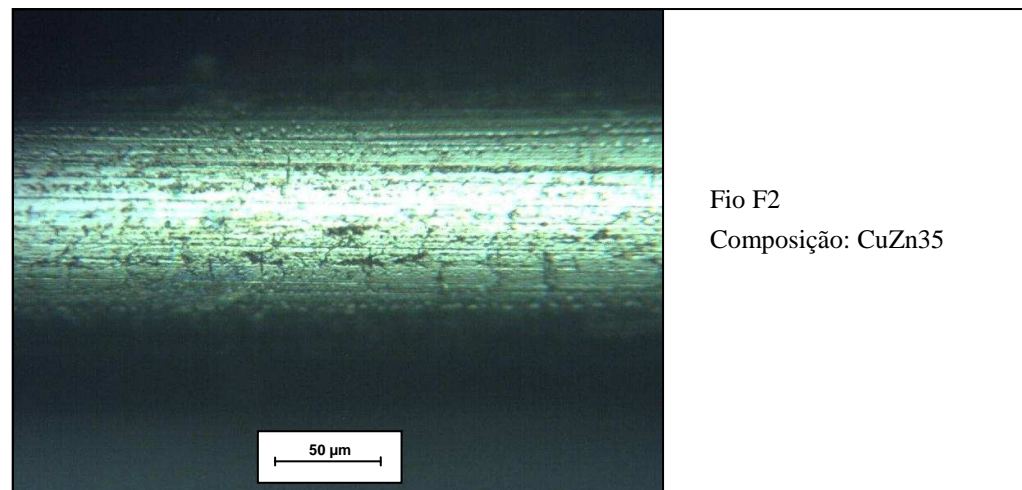


Figura 5.16 – Micrografia da superfície livre do fio F2.

Pode-se observar que o fio F2, mostra vários pontos de deformações plásticas ao longo da sua superfície. Portanto pode-se comprovar a grande diferença de qualidade de fabricação entre fios F1 e F2.

Apesar de uma análise micrográfica ser um bom método de verificação da qualidade do fio para WEDM, conforme mostrado na Fig. 5.15 e Fig. 5.16, outros métodos podem e devem ser empregados para seu uso na fabricação de ferramentas. Pode-se destacar a verificação da sua resistência à tração, exatidão do seu diâmetro, composição, e principalmente ruptura durante todo consumo da bobina.

Sendo o foco da presente dissertação, foi realizado a análise na integridade do topo e lateral usinada. A Fig. 5.17 e Fig. 5.18 mostram os resultados obtidos para o fio F2.

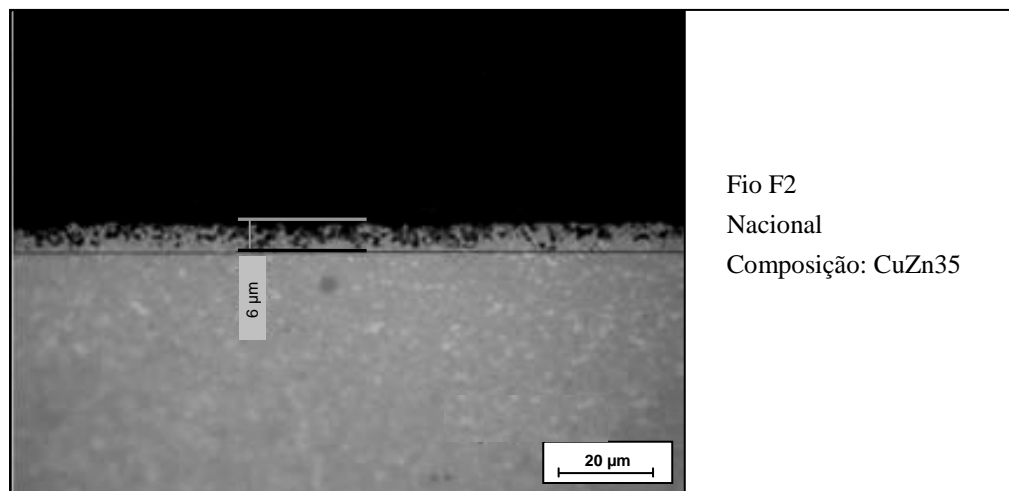


Figura 5.17 – Metalografia do topo da amostra de metal duro para o tipo de fio F2.

Comparando a região do topo das amostras usinadas entre os fios F1 e F2, mostradas na Fig. 5.13 e Fig. 5.17 respectivamente, pode-se observar as mesmas características e os mesmos resultados de dissolução de Co (profundidade de 6 μm ao longo da superfície). Previsto devido ao não contato da ferramenta com a peça e apenas o contato do dielétrico nesta região.

Conforme mostra a Fig. 5.18, na lateral usinada foram encontradas microtrincas de até 4 μm de profundidade como também pontos de corrosão da mesma dimensão.

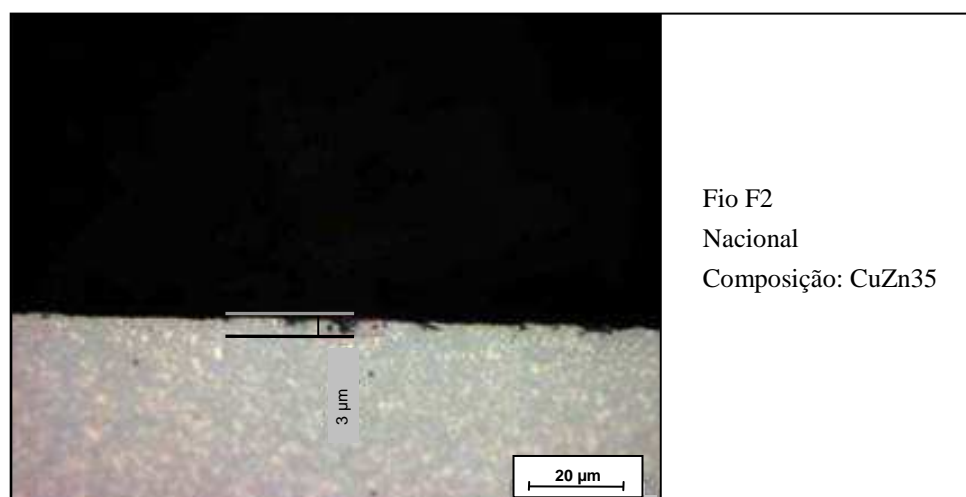


Figura 5.18 – Metalografia da lateral da amostra usinada para o tipo de fio F2.

Com as análises realizadas, pode-se constatar que o fio F2 apresentou resultados semelhantes de danificação na superfície usinada (lateral) em

comparação ao fio F2. Estas danificações podem ser consideradas microtrincas geradas pela descarga elétrica em conjunto com a ação do dielétrico que provoca a dissolução de Co. Deve-se destacar que a amostra do fio F2 apresentou maior concentração de danificações na superfície usinada do que a amostra com fio F1, mostradas na Fig. 5.14. Entretanto tais danificações foram menores, sendo encontradas em profundidade de até 3 μm . Pode-se afirmar então, que apesar da superfície livre do fio F2 ter apresentado maiores concentrações de defeitos de fabricação, este aspecto não influenciou nas danificações causadas pelo processo WEDM na superfície do metal duro.

Em seguida foi realizado a verificação da exatidão geométrica nas amostras usinadas com os fios F1 e F2. Agie (2003) propõe a avaliação da exatidão geométrica gerada pela máquina, em amostras de perfil quadrado. Entretanto, optou-se pela amostragem padrão usado até então que possui perfil cilíndrico, pela geração de uma movimentação em conjunto dos eixos X e Y da máquina. Assim, diferentemente em um perfil quadrado, existe a interpolação dos eixos X e Y pelo comando CNC da máquina, garantindo uma maior confiabilidade nos experimentos.

Vale destacar que este tipo de medição verifica a exatidão geométrica de conicidade e qualquer variação do perfil ao longo dos 70 mm de altura da amostra em três pontos, sendo a dimensão nominal do diâmetro das amostras igual a 8 mm. Para tal, foi medido 5 mm abaixo da extremidade superior da amostra, dado como ponto 01, no meio da amostra, dado como ponto 2 e 5 mm acima da extremidade inferior, dado como ponto 03.

A Tab. 5.4 mostra os resultados de exatidão geométrica obtidos comparando o perfil das amostras usinadas com os dois tipos de fio F1 e F2.

Tabela 5.4 – Resultados de exatidão geométrica nos três pontos do perfil das amostras.

Tipo de fio	Ponto 01 (mm)	Ponto 02 (mm)	Ponto 03 (mm)	Conicidade (mm)	S_m (\pm mm)
F1	7,999	7,997	7,995	0,004	0,002
F2	7,996	7,995	7,996	0,001	0,0005

A partir dos resultados obtidos na Tab. 5.4, pode-se analisar que os dois tipos de fios geram bons resultados de exatidão geométrica nas amostras usinadas, sendo a conicidade obtida igual a 0,004 mm e S_m igual a 0,002 mm para o fio tipo

F1. Os valores obtidos para o fio F2 foram de 0,0005 mm para S_m e 0,001 mm para conicidade. Nota-se então que os valores da exatidão geométrica encontrados para usinagem com os dois tipos de fios estão de acordo com os valores estabelecidos pela tabela de tecnologia usada, onde foram selecionados os valores de S_m igual a 0,0025 mm e conicidade de 2 a 6 μm , anteriormente mostrados na Tab. 5.1 deste capítulo.

De grande importância na avaliação da qualidade de peças usinadas pelo processo de WEDM, constando também como parâmetro de seleção deste processo de usinagem, foi realizada a medição da rugosidade R_a para os dois tipos de fios. A Tab. 5.5 mostra os valores encontrados.

Tabela 5.5 – Valores de rugosidade R_a da superfície usinada.

Tipo de fio	R_a (μm)
F1	0,14
F2	0,13

Para os valores de rugosidade R_a pode ser observado que os dois tipos de fios geram resultados semelhantes nas amostras de metal duro usinadas. Tais valores, conforme mostrado na Tab. 5.5, são menores que os descritos pela tabela de tecnologia usada de 0,15 μm . Os valores de rugosidade R_a encontrados de 0,14 μm para o fio F1 e 0,13 μm para o fio F2, são aproximadamente iguais e menores em 11% para o fio F2 e 8% para o fio F1 em relação ao requisito de projeto da peça, conforme Tab. 5.1. Isto pode ser explicado pela diferença de metal duro estabelecido pela tabela de tecnologia recomendada por Agie (2003) e o usado nos experimentos. Portanto, os resultados mostram que os dois tipos de fios, não geram diferenças significativas nas danificações na superfície usinada (camada limite), rugosidade R_a e taxa de corte V_w . Ambos atendo o processo de fabricação de punções e matrizes de metal duro.

Vale ressaltar que segundo Agie (2003), existem tabelas de tecnologia que possuem seis etapas de usinagem (desbaste mais cinco acabamentos). Entretanto estas, de código ehmccd25nnn040b015070 e ehmcca25nnn025b020070, oferecem resultados de rugosidade R_a igual a 0,2 μm e T_{km} de ± 4 μm respectivamente. Ou seja, valores maiores que o grau de acabamento e exatidão geométrica requeridas no projeto de uma ferramenta, mostrados anteriormente na Tab. 4.2.

Como resultado geral da avaliação da exatidão geométrica resultante do presente trabalho, conclui-se que o processo de usinagem de metal duro com os parâmetros estabelecidos, atende a fabricação de ferramentas de estampagem por apresentarem ótimos valores de rugosidade R_a e boa exatidão geométrica, estando todos dentro do pré-estabelecido.

5.5 Modificação dos parâmetros de descarga elétrica do gerador da máquina

Com objetivo de maior conhecimento e otimização do desenvolvimento do processo de WEDM para metal duro em questões de qualidade, já previamente discutidas, mas também rendimento, foi realizado um estudo entre os regimes de usinagem nas condições atuais do processo (conforme tabela de tecnologia padrão) e em seguida modificações nos parâmetros passíveis para tal.

Neste capítulo primeiramente são mostrados os resultados do processo atual e após os resultados das modificações estudadas, conforme procedimento descrito no capítulo 4.

5.6 Estudo entre os regimes de usinagem - avaliação do estado atual

Para realização dos experimentos, foram utilizados os parâmetros de usinagem conforme resultados desejados mostrados na Tab. 4.2 e pré-selecionados pela tabela de tecnologia padrão da máquina, mostrados na Tab. 5.1. Este tipo de análise tem o objetivo de investigar os parâmetros do gerador e estabelecer uma relação lógica entre estes e os resultados gerados na superfície usinada para estabelecer possíveis ganhos de rendimento na usinagem do metal duro. Conseqüentemente, melhorar o custo da fabricação de ferramentas de estampagem como também para outras aplicações da WEDM em metal duro.

A Tab. 5.6, mostra tais parâmetros de usinagem, segundo Agie (2004). Vale ressaltar que para este experimento foram usados os parâmetros de dielétrico, metal duro 5 e fio F2, previamente selecionados nos experimentos focados em qualidade anteriormente descritos.

Tabela 5.6 – Parâmetros de usinagem fornecidos pela tabela de tecnologia recomendada (padrão), conforme código ehmc25nnn025b015070. (Agie - 2004).

Parâmetros	Descrição	Variação	Valor em cada regime de usinagem						
			HS	Ns1	Ns2	Ns3	Ns4	Ns5	Ns6
I	Corrente de descarga	0 a 22	19	12	12	11	5	2	2
P	Potência de descarga	1 a 35	24	35	25	25	35	20	20
Td	% de pulsos inativos	10 a 93	28	32	14	14	-	-	-
Fw (N)	Tensão no fio	1 a 30	17	20	20	20	20	20	20
P (bar)	Pressão de fluxo do dielétrico	0,2 a 18	14	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
Q	Tipo de fluxo do dielétrico	0; 11 a 14 e 16; 17	13	14	14	13	13	13	13
ofs (μm)	Distância da geometria programada até o centro do fio	-	219	159	151	146	136	132	131

Os parâmetros mostrados na Tab. 5.6, segundo Agie (2004), são os parâmetros possíveis de variação e indicado apenas para o regime de desbaste, sendo descritas algumas indicações para cada um deles. Nota-se que apenas alguns possuem indicação de unidade e a maioria não representam o seu real valor segundo norma VDI 3402.

As indicações de variação descritas expressam apenas efeito de visualização para acompanhamento na prática do processo. Para um melhor conhecimento destes parâmetros, realizou-se o seguinte comparativo entre Agie (2004) e norma VDI 3402:

Regime HS: Indicação do regime de desbaste, ou seja a 1º etapa do processo de usinagem entre as sete realizadas;

Regimes Ns1 a Ns6: Indicação dos regimes de acabamento, ou seja, da 2º etapa a 7º etapa do processo de usinagem recomendado;

Corrente de descarga I: Segundo norma VDI 3402 este parâmetro é dado em ampéres (A) e corresponde a corrente média de descarga elétrica dado por \hat{I}_e . Destaca-se que todas as referências pesquisadas afirmam que este parâmetro exerce forte influência em V_w e na camada limite da peça usinada. Nota-se na Tab. 5.6, que a medida que os regimes de acabamento vão sendo executados da 2º a 7º etapas (Ns1 a Ns6), \hat{I}_e diminuiu de 19 para 2. Segundo Agie (2004) a variação entre o valor 5 a 19 corresponde aproximadamente 2 A a 580 A.

Tensões são descritas em torno de 60 V a 250 V. Via CNC, executa-se automaticamente um módulo de inversão de polaridade entre a peça e o fio. Este recurso, é chamado por fabricantes de máquinas de WEDM de “sistema anti-eletrólise”, sendo uma tecnologia desenvolvida para o não surgimento do fenômeno de remoção das partículas metálicas de um eletrodo para outro, conforme mostrado na Fig. 3.1b de Sommer et al (1994).

Tempo de retardo t_d : Refere-se ao tempo de retardo t_d segundo VDI 3402. Chamado como percentual de pulsações inativas, conforme Agie (2004). Este último descreve ser um percentual aproximado de 75% do tempo de descarga. A duração de descarga t_e (t_e para VDI 3402) é descrita como aproximadamente 100 ns e frequência de descarga de 400 kHz. Os reais valores em cada etapa de usinagem, conforme anteriormente descrito, não podem ser mensurados e por registro de patente reconhecida.

Potência de descarga P : Conforme VDI 3402 corresponde a energia de descarga W_e , sendo igual ao produto da tensão média \hat{u}_e , corrente média \hat{i}_e e duração da descarga t_e . Segundo Agie (2004), parâmetro que depende fortemente do valor de \hat{i}_e ;

F_w : Tensão do fio fornecida em newton (N). Não é considerado um parâmetro do gerador da máquina e sim um parâmetro de ajuste do processo que melhora as condições de rompimento do fio e exatidão geométrica gerada na peça usinada;

P (bar) e Q : Pressão P do dielétrico para limpeza do processo e Q o tipo de fluxo (superior e ou inferior), aplicados na localização das respectivas guias,;

ofs: Significa a soma do raio do fio e fenda de trabalho até a superfície programada da peça, usualmente chamada de offset. Considerada o sobremetal de usinagem.

Com estudados dos parâmetros descritos e seus significados segundo norma VDI 3402, observa-se o não padrão usado na parametrização destes. Por esta simbologia não padronizada e unificada entre fabricantes, constata-se a dificuldade do desenvolvimento do processo de WEDM em universidade e na indústria.

Após o estudo das variáveis do gerador, realizou-se a avaliação do regime desbaste (1º etapa) conforme tabela de tecnologia até então usado para experimentos anteriores. Os resultados da integridade da superfície usinada são mostrados na Fig. 5.19 e 5.20.

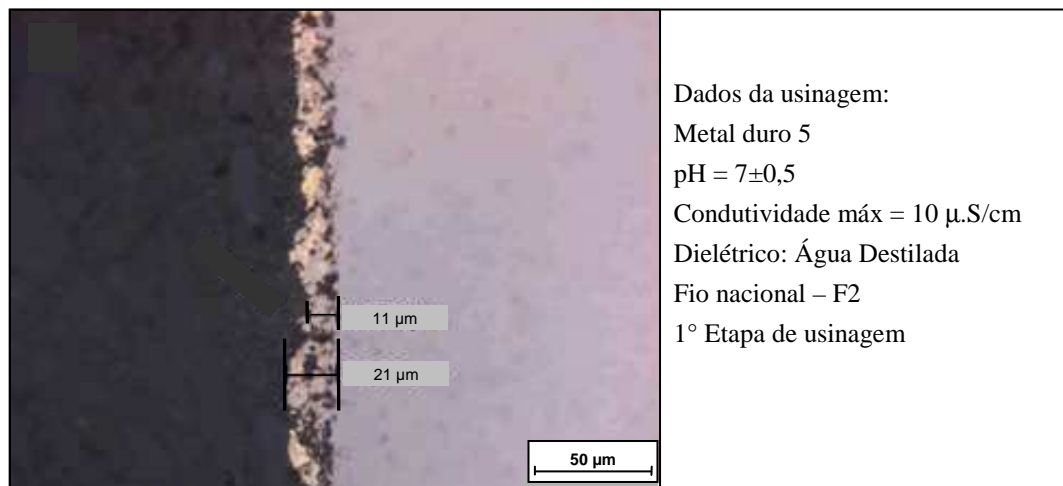


Figura 5.19 – Metalografia da lateral da amostra usinada após regime de desbaste. Detalhe de camada danificada.

Observa-se na lateral usinada do metal duro, uma camada porosa, danificada e de cor amarelada com espessura máxima de $21 \mu\text{m}$ e mínima de $11 \mu\text{m}$. Estas características revelam a deposição de partículas do fio ($65\%\text{Cu}+35\%\text{Zn}$) sobre a superfície do metal duro.

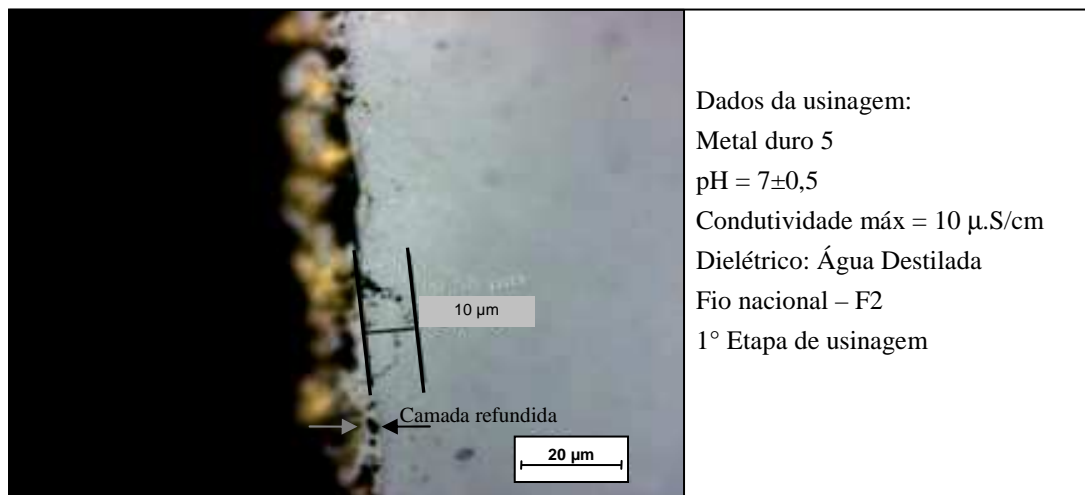


Figura 5.20 – Metalografia da lateral da amostra usinada após o regime de desbaste. Detalhe das microtrincas e danificações encontradas.

Conforme mostra a Fig. 5.20, existe abaixo da camada amarelada, microtrincas de $10 \mu\text{m}$ de profundidade. Isto está de acordo com Heuvelman (1980), Chang et, al. (2003), Maggi et.al (1991), Lämmle (1995), que citam o efeito negativo do processo de WEDM devido a sua natureza térmica de remoção por descargas elétricas e assim, a necessidade de estudos de otimização destes efeitos.

Nota-se então, que as danificações totais geradas pelo processo de WEDM na camada limite do metal duro, é a soma de 21 μm de camada refundida e 10 μm de microtrincas. Portanto, a zona termicamente afetada (ZTA) é de aproximadamente 31 μm de profundidade. Na Fig. 5.20, pode-se notar ainda uma camada refundida e porosa de aproximadamente 5 μm .

Pode-se correlacionar que este conjunto de danificações é inaceitável nos elementos cortantes de uma ferramenta, pois entre o punção e a matriz usa-se folgas de corte total igual a 10% da espessura usual de 0,5 mm das lâminas de motores e geradores elétricos. Portanto, a folga de corte no início da vida de uma ferramenta é de 0,025mm. Como os defeitos encontrados são maiores, os esforços de corte envolvidos no processo de estampagem eliminam tais danificações com poucos ciclos. Desta forma, a folga de corte dobraria de tamanho, gerando rebarbas e quebras prematuras na ferramenta.

Pode-se constatar que no regime de desbaste, aplica-se a maior corrente \hat{i}_e e conseqüentemente maior W_e , desta forma pode-se explicar os danos gerados na superfície usinada do metal duro.

A Fig. 5.21 mostra a principal danificação encontrada após a 2ª etapa de usinagem, ou seja, regime de desbaste mais um regime de acabamento. Aplica-se nesta etapa uma corrente de descarga \hat{i}_e de valor igual a 12. Consideravelmente menor que a aplicada para o regime de desbaste, igual a 19. Já o valor de W_e , igual a 35, é maior nesta etapa do que no regime de desbaste (segundo maior), igual a 24.

Ressalta-se que não foi possível realizar uma análise do tempo de retardo t_d , pois a tabela de tecnologia não revela seu valor.

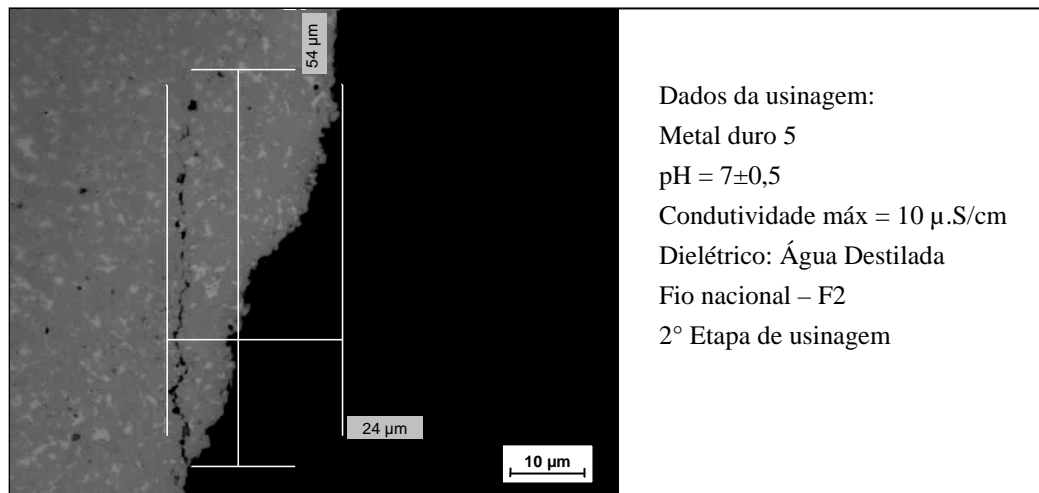


Figura 5.21 – Metalografia da lateral da amostra usinada após um desbaste e um acabamento. Detalhe da microtrinca encontrada.

Pode-se observar que houve a eliminação dos resíduos de Cu provenientes do fio, encontrados para o regime de desbaste. Entretanto, foi encontrada uma microtrinca de profundidade igual a $24 \mu\text{m}$ e comprimento de $54 \mu\text{m}$. Verifica-se também que esta microtrinca é paralela à superfície usinada da amostra de metal duro.

Pode-se considerar este tipo de defeito proveniente da alta energia de descarga W_e aplicada nesta etapa de usinagem, sendo o resultado extremamente negativo na qualidade da camada limite de punções e matrizes de metal duro.

Em seguida, foi executada a análise metalográfica da 3º etapa de usinagem, conforme mostra as Fig. 5.22 e Fig. 5.23.

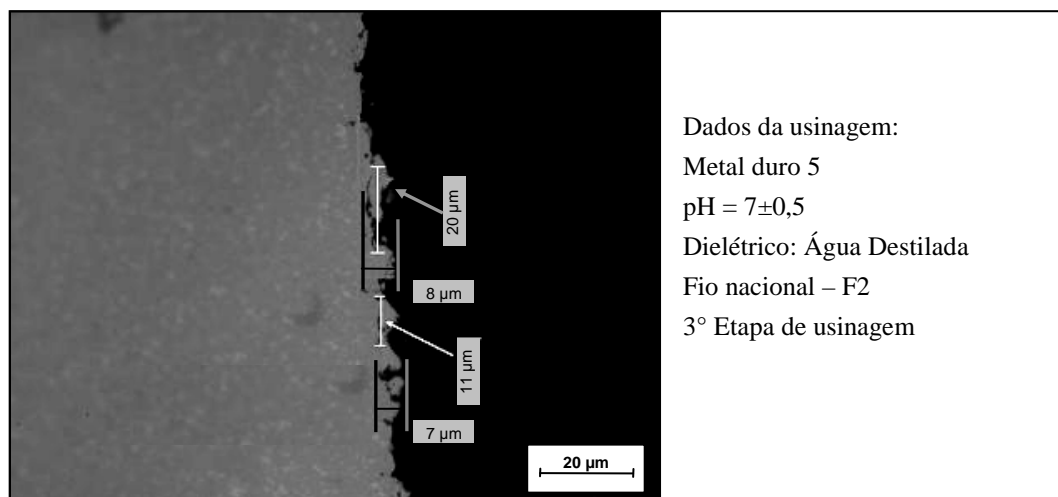


Figura 5.22 – Metalografia da lateral da amostra usinada após um desbaste e dois acabamentos. Detalhe das microtrincas encontradas.

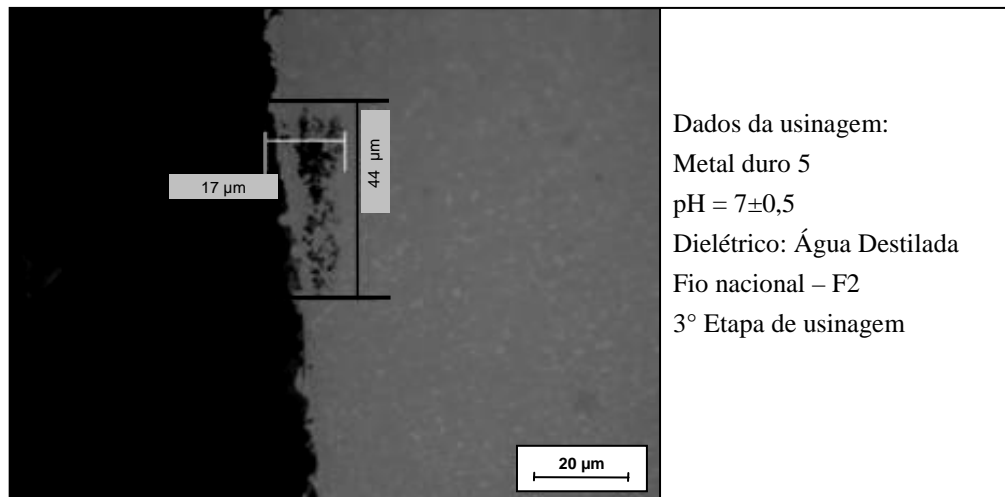


Figura 5.23 – Metalografia da lateral da amostra usinada após um desbaste e dois acabamentos. Detalhe da dissolução do ligante de Co encontrada.

Pode-se observar na Fig. 5.22, a diminuição das microtrincas encontradas na etapa anterior (desbaste e um acabamento), mas nesta 3ª etapa, observa-se ainda o efeito predominante de microtrincas com 11 μm a 20 μm de comprimento em profundidade de 7 a 8 μm e em grande quantidade ao longo da superfície usinada do metal duro. Estas danificações podem ser atribuídas ao valor elevado da corrente de descarga \hat{i}_e e energia W_e . Em contrapartida, o valor de t_d aplicado é o maior dos valores dados pela tabela de tecnologia, desta forma, tem-se uma boa remoção das partículas de metal duro e fio ejetados na fenda de trabalho, melhorando as condições de usinagem.

Conforme mostra a Fig. 5.23, nota-se também a ocorrência de dissolução de Co em profundidades de 17 μm e comprimento de 44 μm . Tais danificações foram observadas abaixo da superfície usinada e podem ser atribuídas ao efeito do dielétrico da WEDM e sua introdução nas microtrincas geradas pela descarga elétrica, conforme descrito por Lämmle (1997).

A Fig. 5.24 mostra as danificações na superfície usinada do metal duro para 4ª etapa de usinagem, onde foram aplicados um desbaste e três acabamentos conforme estabelecido pela tabela de tecnologia selecionada.

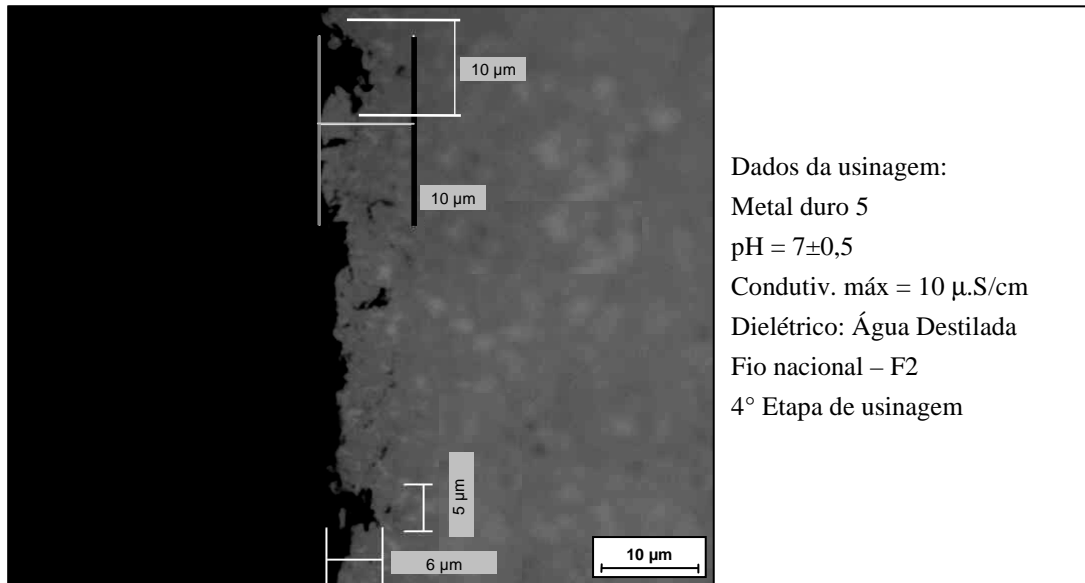


Figura 5.24 – Metalografia da lateral da amostra usinada após um desbaste e três acabamentos. Detalhe das danificações encontradas.

Conforme mostra a Fig. 5.24, foram encontrados zonas em profundidades máximas de $10 \mu\text{m}$ de danificações na lateral usinada. Tais danificações apresentam características de microtrincas com perda de WC e ligante do metal duro com $10 \mu\text{m}$. O valor encontrado segue a tendência de melhoria na integridade da superfície usinada à medida que as etapas de usinagem vão sendo executadas, segundo Maggi et al (1991) e Lämmle (1995). Entretanto a Fig. 5.24 ainda revela que há a ocorrência de microtrincas em conjunto com a dissolução de Co em grandes quantidades ao longo da superfície usinada do metal duro, mesmo após a aplicação de três acabamentos.

Na Fig. 5.25, referente a 5º etapa de usinagem, pode-se verificar a presença predominante do efeito de dissolução de Co. Valores encontrados de $15 \mu\text{m}$ de profundidade e $70 \mu\text{m}$ de comprimento mostram que apesar do tempo de usinagem ser relativamente pequeno em comparação ao tempo total de usinagem, o efeito da água usada como dielétrico influencia no processo juntamente com os parâmetros de descarga. Como exemplo o valor de P igual a 35.

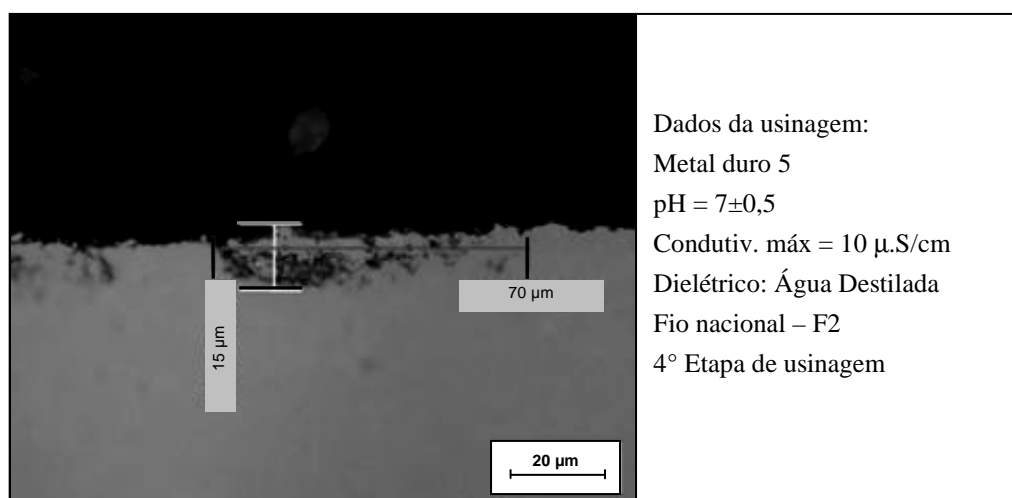


Figura 5.25 – Metalografia da lateral da amostra usinada após um desbaste e quatro acabamentos. Detalhe das danificações encontradas.

Fator importante que deve ser destacado e pode ser conciliado com os resultados encontrados na 4ª e 5ª etapas de usinagem, é que após a 1ª etapa, a condutividade do dielétrico aumenta devido à grande quantidade de partículas de metal duro e fio expelidas da fenda de trabalho para o tanque da máquina. Observou-se valores próximo a $15 \mu\text{S/cm}$, sendo reduzido ao longo do processo pela filtragem e deionização do dielétrico da máquina, chegando ao fim da usinagem na 4ª etapa com valor aproximadamente de $7 \mu\text{S/cm}$, tornando a sua medição difícil. O pH do dielétrico pode ser controlado via adição de soluções de composição orgânica comercializada por diversos fabricantes.

A Fig. 5.26 mostra os efeitos gerados na superfície usinada após a 6ª etapa de usinagem, ou seja, regime de desbaste mais cinco etapas com regime de acabamento.

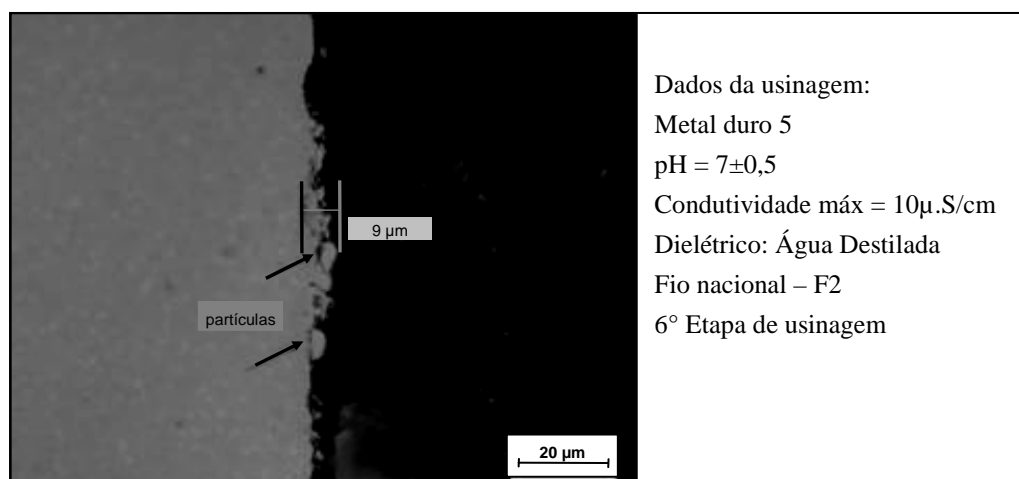


Figura 5.26 – Metalografia da lateral da amostra usinada após um desbaste e cinco acabamentos. Detalhe das danificações encontradas.

Nesta etapa pode-se verificar diminuição na quantidade de danificações na superfície usinada do metal duro, mas ainda encontradas em profundidades de $9 \mu\text{m}$ de espessura. Tais danificações possuem regiões com deslocamentos de parte do metal duro e partículas em formato de “gotas” em fase de desprendimento da superfície usinada, caracterizando, o efeito de formação de “crateras”. Estas “gotas” com a formação de crateras, resultado característico gerado pelo processo de remoção térmica da WEDM, conforme descrito por Amorim e Weingaertner (2004), Van Dijk (1973) e Chang et al (2003), são geradas do formato que a camada limite apresenta após a remoção por eletroerosão, que provocam crateras na superfície usinada e como resultado, os produtos expelidos possuem formato esférico.

As danificações encontradas para o último regime de acabamento, ou 7º etapa, previamente mostradas nas Fig. 5.14 e Fig. 5.18, possuem valores entre $3 \mu\text{m}$ a $4 \mu\text{m}$ de profundidade. Estas danificações, ainda que possam ser consideradas propícias à propagação de uma trinca em punções e matrizes de estampagem, são menores se comparados com os defeitos das etapas anteriores de usinagem.

Comparando os parâmetros mostrados na Tab. 5.6, verifica-se que não há diferenças entre as correntes \hat{i}_e e energia de descarga W_e entre as duas últimas etapas de usinagem (6º e 7º etapas). Assim, a diminuição das danificações entre estas etapas pode ser relacionada com a diferença da pressão do fluxo de dielétrico P . Observa-se que para a 6º etapa o valor é igual a 0,2 bar e para 7º etapa igual a 0,3 bar. Esta última cria melhor condição de remoção das partículas usinadas da fenda de trabalho.

Outro parâmetro diferenciado nesta etapa é o ofs aplicado, onde para 6º etapa é igual 132 μm e 7º etapa igual a 131 μm . Esta diferença gera para 7º etapa menor volume de partículas usinadas à serem removidas da fenda de trabalho, reforçando a melhoria encontrada juntamente com o aumento do fluxo de pressão do dielétrico P.

Apesar de nenhuma teoria ter sido encontrada à respeito, pode existir uma diferença de condição da superfície inicial a ser usinada para execução de cada etapa, gerado pelo regime de usinagem anterior, ou seja, na 6º etapa, a integridade da superfície usinada está afetada conforme resultados gerados na etapa anterior, no caso, os resultados da 5º etapa, que apresentara m danificações de até 15 μm de profundidade.

Confrontando os valores de sobremetais (ofs), segundo Agie (2004), com as microtrincas encontradas para cada etapa de usinagem, pode-se concluir que não há a ocorrência de microtrincas da etapa anterior que permanecem para serem removidas na etapa subsequente, pois a profundidade das danificações encontradas é menor que o sobremetal aplicado para cada uma delas. Destaca-se ainda, que o sobremetal total é igual a 219 μm dado pelo regime de desbaste.

A Tab. 5.7 mostra segundo Agie (2204), os sobremetais para cada regime de usinagem em comparação com as microtrincas encontradas em cada uma delas no presente trabalho.

Tabela 5.7 – Sobremetal e danificações encontradas nos regimes desbaste e acabamentos.

Processo de usinagem	1º Etapa desbaste	2º Etapa acab. 01	3º Etapa acab. 02	4º Etapa acab. 03	5º Etapa acab. 04	6º Etapa acab. 05	7º Etapa acab. 06
Sobremetal “ofs” (μm)	219	159	151	146	136	132	131
Microtrincas + corrosão (μm)	31,56	23,76	17,02	10,09	14,99	8,63	4,05

Segundo Maggi et al (1991), as várias etapas de usinagem são estabelecidas para evitar a permanência das danificações causadas no regime de desbaste, que no caso estudado, apresenta valor máximo de aproximadamente 22 μm . Portanto,

conforme mostra a Tab. 5.7, comparando-se o sobremetal total dado no regime de desbaste, igual a 219 μm e a soma das danificações na superfície do metal duro, que possui valor igual a 110 μm , verifica-se que há um super-dimensionamento no sobremetal dado pela tabela de tecnologia padrão. Observa-se também, que além da microtrinca diminuir com os repasses de regime de acabamento aplicados, entre a 5° e 7° etapas de usinagem se obtém a menor diferença entre as danificações de usinagem e sobremetal (ofs).

A partir desta análise, foi realizado um experimento com a variação na quantidade de regimes de usinagem aplicados. Os resultados são apresentados e discutidos no próximo subcapítulo.

5.7 Variação na quantidade de regimes de usinagem

Com os resultados obtidos nas análises de cada regime de usinagem, verifica-se a possibilidade de otimização do processo de WEDM estudado, com a retirada da 6° etapa (desbaste e cinco regimes de acabamento) do processo normal de usinagem utilizado até então. Esta otimização foi definida a partir da verificação do “sobremetal de segurança” mostrado no subcapítulo anterior, pois com a diminuição de material a ser usinado há um aumento na taxa de corte V_w . Acredita-se ainda, a possibilidade de não maximização das danificações causadas na camada limite, pois conforme mostra a Tab. 5.6, a 6° etapa possui os mesmos parâmetros que a 7° etapa de usinagem.

Sendo assim, foram novamente verificados o tempo de usinagem, V_w e a quantidade e tamanho das danificações (microtrincas e dissolução de Co) após esta modificação na tabela de tecnologia padrão. Conforme mostra a Tab. 5.6, ressalta-se que os parâmetros iguais entre a 6° e 7° etapas, são a corrente e energia de descarga I_e , energia de descarga W_e , os parâmetros F_w , P , e Q , que são tensão do fio, pressão e tipo de lavado respectivamente. Entretanto, nada pode ser afirmado sobre o tempo de retardo t_d por este não ser fornecido pela tabela de tecnologia da máquina.

Este experimento foi realizado através da modificação dos parâmetros de usinagem da tabela padrão, via CNC. Os resultados de tempo de usinagem obtidos e conseqüentemente a taxa de corte V_w , podem ser observados na Tab. 5.8 e Tab. 5.9, respectivamente.

Tabela 5.8 – Tempos de usinagem para em cada etapa. Comparação de resultados entre a tabela padrão e alterada com a diminuição da 6ª etapa.

Processo de usinagem	1º Etapa desbaste	2º Etapa acab. 01	3º Etapa acab. 02	4º Etapa acab. 03	5º Etapa acab. 04	6º Etapa acab. 05	7º Etapa acab. 06	Total
Normal (min)	29	22	12	10	16	12	16	117
Alterado (min)	28	20	12	10	16	0	16	102

Tabela 5.9 – Taxa de corte V_w das amostras em cada etapa. Comparação de resultados entre a tabela padrão e alterada com a diminuição da 6ª etapa.

Regime de usinagem	V_w (mm ² /min)	
	Normal	Alterado
1º Etapa – regime de desbaste	61	63
2º Etapa – regime de acabamento 01	80	88
3º Etapa – regime de acabamento 02	147	147
4º Etapa – regime de acabamento 03	176	176
5º Etapa – regime de acabamento 04	110	110
6º Etapa – regime de acabamento 05	147	0
7º Etapa – regime de acabamento 06	110	110
Total	15	17

Nota-se então, que para o processo de diminuição da 6ª etapa, obtém-se um aumento na taxa de corte V_w . As condições alteradas apresentam valor igual a 17 mm²/min, contra 15 mm²/min para as condições dadas pela tabela de tecnologia padrão. Isto representa um ganho de aproximadamente 12% na taxa de corte V_w e conseqüentemente aumento no rendimento da fabricação de matrizes e punções de metal duro.

Em seguida, foram verificados a exatidão geométrica, qualidade do acabamento e integridade da superfície usinada. A Tab. 5.10 mostra os resultados de exatidão geométrica obtidos para cada amostra.

Tabela 5.10 – Valores de exatidão geométrica nos três pontos do perfil das amostras.

Condições	Ponto 01 (mm)	Ponto 02 (mm)	Ponto 03 (mm)	Conicidade (mm)	S_m (± mm)
Normal	7,999	7,998	7,999	0,001	0,0005
Alterada	7,998	7,996	7,995	0,003	0,0015

Nota-se nos resultados apresentados na Tab. 5.10, que a condição alterada gera bons resultados de exatidão geométrica, com valores de conicidade igual a 0,003 mm e S_m igual a 0,0015 mm. Ambos estão dentro dos requisitos de projeto conforme mostra a Tab. 4.2, comprovando a garantia de exatidão geométrica do processo mesmo com a diminuição de uma etapa de usinagem.

Em seguida foi realizada a medição da rugosidade R_a da superfície usinada. A Tab. 5.11 mostra a comparação dos resultados encontrados nas condições normal (padrão) e alterada.

Tabela 5.11 – Valores de rugosidade R_a da superfície usinada para condições normal e alterada.

Condições	R_a (μm)
Normal	0,13
Alterada	0,14

Na Tab. 5.11, percebe-se um ligeiro aumento da rugosidade R_a com a diminuição da 6ª etapa de usinagem. Isso pode ser explicado pela distribuição do sobremetal de 5 μm que foi dividido entre os regimes, pois entre a 6ª e 7ª etapas perde-se esse dimensional sendo necessário corrigi-lo para que a peça fique dentro da tolerância geométrica desejada.

Para completar a verificação dos efeitos da modificação nas seqüências de usinagem aplicada para este experimento, foi realizada a análise metalográfica para amostra com a diminuição da 6ª etapa na superfície do topo e lateral do metal duro. A Fig. 5.27 mostra o resultado encontrado no topo da amostra.

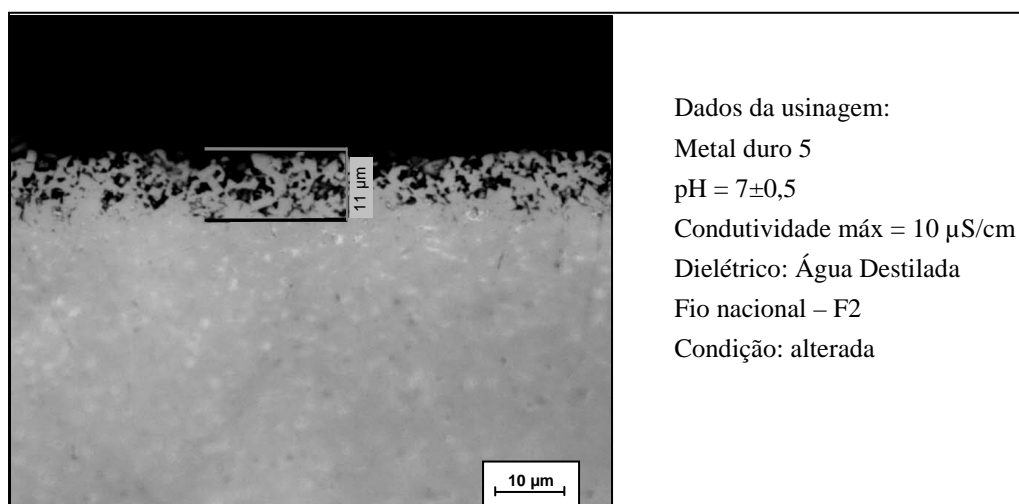


Figura 5.27 – Metalografia do topo da amostra usinada após um desbaste e cinco acabamentos. Detalhe das danificações encontradas com profundidade de $11 \mu\text{m}$.

Conforme destaca a Fig. 5.27, a dissolução encontrada no topo da amostra foi de $11 \mu\text{m}$ para o experimento com a retirada da 6ª etapa de usinagem.

Foi realizada também a análise na lateral usinada para verificação das inerentes danificações geradas pelo processo de WEDM, até então observadas em todas as análises realizadas. A Fig. 5.28 mostra o resultado encontrado.

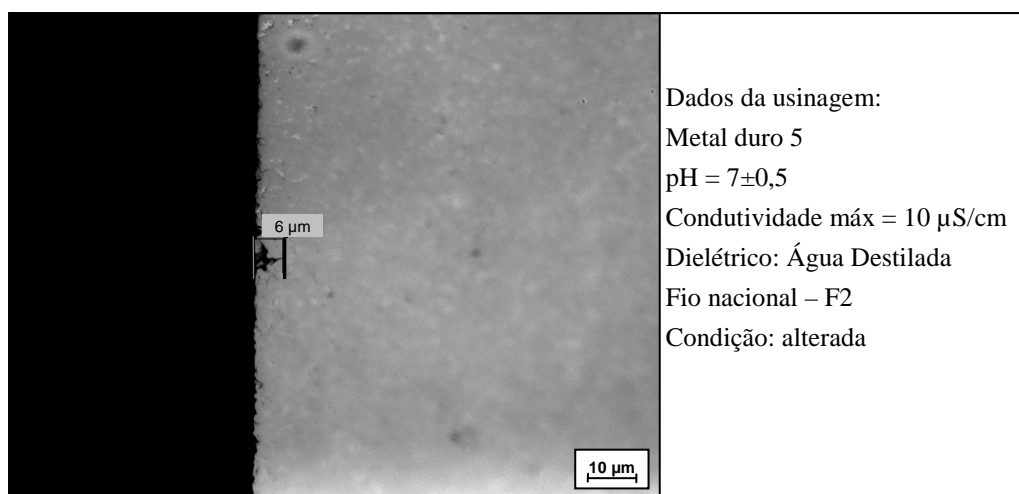


Figura 5.28 – Metalografia da lateral da amostra usinada após um desbaste e cinco acabamentos. Detalhe das danificações encontradas.

Na Fig. 5.26 e Fig. 5.27, as microtrincas encontradas na lateral usinada com profundidade de $6 \mu\text{m}$ e dissolução de Co no topo de $11 \mu\text{m}$, mostram que a diminuição de uma etapa de acabamento de usinagem provoca um aumento de 2 a $3 \mu\text{m}$ nas danificações se comparadas com os melhores resultados previamente encontrados (Fig. 5.14 e Fig. 5.18).

Portanto, pode-se considerar que existe a possibilidade de aumento na taxa de corte V_w com pequeno aumento das danificações na integridade da superfície usinada. Deve-se então, analisar a real aplicação da peça usinada com tal modificação nos parâmetros do gerador da máquina de WEDM. Em ferramentas de estampagem de lâminas elétricas, pode ser aplicada em punções e matrizes de baixa criticidade, como exemplo em peças de grande dimensional, robustez ou geometria simples que gera baixo esforço de corte. Vale ressaltar, que os resultados encontrados dependem muito da máquina e sua tabela de tecnologia (parâmetros de descarga), pois cada fabricante possui diferenciações entre as tecnologias de usinagem, como exemplo na quantidades de etapas (regime de usinagem) e respectivos sobremetais.

Em relação à rugosidade R_a pode-se constatar também um aumento em relação ao resultado anterior encontrado, de $0,13 \mu\text{m}$. Com a alteração da tabela de tecnologia, foi constatado um valor de $0,14 \mu\text{m}$ na rugosidade R_a , ou seja, aumento em 13%. Como já descritas anteriormente, baixas rugosidades, melhoram a vida das matrizes e punções, mas este fato ainda é merecedor de pesquisas, como exemplo na resistência à fratura transversal em diferentes rugosidades.

Com os resultados obtidos, verificou-se um possível ganho na taxa de corte total com a eliminação da 6ª etapa de usinagem, com aumento de 9% em relação aos parâmetros oferecidos pela tabela de tecnologia da máquina (condições padrões). Este valor é considerado representativo em máquinas de WEDM dedicadas.

Pode-se analisar que uma máquina de WEDM com rendimento de 75% durante 24 horas por dia (descontando os tempos de preparação da peça, troca de fio, manutenção preventiva e corretiva), tem-se um tempo anual de 6570 horas de usinagem com remoção de material. Portanto, com a alteração da tabela de tecnologia proposta, pode-se obter um ganho anual de 591 horas de usinagem. Constatou-se através de benchmark, que o custo médio para o processo de WEDM em metal duro é de R\$ 100,00 por hora, sendo assim a redução de 12% gera uma redução de custo anual de fabricação de punções igual a R\$ 59.100,00 por máquina.

Com a redução de etapas de usinagem, existe também o ganho de cunho ambiental, com a redução do consumo de cobre (fio eletrodo), para mesma quantidade de horas de usinagem. Sendo este um material nobre, retirado da

natureza e trefilado para ser a ferramenta de usinagem deste processo de transformação, a WEDM.

Como avaliação geral das análises, destaca-se que na usinagem do metal duro 5, utilizando água destilada e controlada como dielétrico, o topo das amostras apresentam variação de corrosão em profundidades de 6 a 11 μm . Este valor máximo revela para o processo de fabricação de ferramentas, que após a usinagem por WEDM é necessário a remoção do topo das matrizes e punções para posterior uso na estampagem.

Existe um desgaste gerado pelo escorregamento do aço elétrico na superfície do topo dos elementos de corte, prejudicando a qualidade do produto estampado. Um valor comumente usado pelos fabricantes de ferramentas é a retificação de 0,3 mm de profundidade em retíficas planas, sendo necessária devido ao sobremetal igual a 0,2 mm, usual no fornecimento de blocos de metal duro. Sendo assim, verifica-se pelos resultados do presente trabalho, que as retificações necessárias no metal duro é a soma da tolerância de fornecimento dos blocos e dissolução de Co gerado pelo dielétrico da WEDM, ou seja, valor máximo de 0,211 mm.

Focando a otimização geral no processo de fabricação de matrizes e punções de metal duro para ferramentas de estampagem, vale ressaltar que o processo de retificação gera condições térmicas que também agredem a superfície usinada. Portanto, devem-se realizar cuidados especiais na utilização deste processo para o topo dos elementos cortantes e para o canal de união deixada pelo processo de WEDM. Seus parâmetros, merecedores de mais pesquisas, principalmente para metal duro, foram estudados segundo Hegeman et al (2000) e Silva et al (2006).

Pode-se afirmar que a metodologia aplicada, apesar de dificultosa e demorada, é um bom procedimento para otimização do processo de WEDM em metal duro. Esta metodologia pode-se ser facilmente repetida e confrontada com os resultados que serão apresentados no próximo capítulo.

Com os valores encontrados através da metodologia aplicada, constatou-se que existem ganhos de qualidade e rendimento do processo de fabricação de eletroerosão por fio (WEDM) em metal duro. Pode-se afirmar então, com as análises do dielétrico, metal duro, fio e parâmetros do gerador, que o objetivo do presente trabalho foi atingido com sucesso.

6. CONCLUSÃO

O objetivo da presente dissertação foi de melhorar e desenvolver o processo de fabricação de ferramentas de estampagem que usam metal duro em seus punções e matrizes, para aumento de vida destes componentes que sofrem desgaste, quebras e assim oneram o custo de fabricação de motores elétricos, como também propor análises que possam aumentar o rendimento do processo de WEDM. Com os valores encontrados através da metodologia aplicada, constatou-se que existem ganhos de qualidade e rendimento no processo de fabricação de eletroerosão por fio (WEDM) em metal duro. A presente dissertação foca uma aplicação industrial específica. Porém a WEDM em metal duro é utilizada também em outras aplicações na indústria metal mecânica, como na fabricação de ferramentas para transformadores, dentes de motoserras e de latas de alumínio, garantindo uma aplicação das informações além das do propósito inicial.

Durante o desenvolvimento dos experimentos, concluiu-se para o processo WEDM em metal duro os seguintes aspectos:

a) Grande dificuldade de variação de seus parâmetros de usinagem (gerador máquina) e análise de seus reais valores conforme norma VDI3402, devido a codificação dos mesmos nas tabelas de tecnologias que são desenvolvidas para alguns materiais específicos e estabelecem parâmetros padronizados que não coincidem com as necessidades do usuário, como mostrado para o caso dos metais duros e fios avaliados.

b) A máquina usada para os experimentos gerou nas amostras valores de grandezas macro geométricas dentro das especificações estabelecidas (exatidão geométrica S_m de 2,5 μm , conicidade de 2 a 6 μm e rugosidade R_a máxima de 0,15 μm). Sendo os valores máximos encontrados de 2 μm para S_m , conicidade de 4 μm e rugosidade R_a igual a 0,13 μm .

c) De acordo com as referências estudadas em relação ao dielétrico, constatou-se o efeito negativo da água sem controle de pH, condutividade, tempo de submersão e qualidade para a integridade da superfície do metal duro. O valor obtido de corrosão no topo para a pior situação (amostra submersa por 70 horas em dielétrico comum e não controlado) foi de 28 μm . Os experimentos mostraram que usando água comum como dielétrico, sofrendo apenas a filtragem e deionização, não garantem resultados baixos de dissolução de Co na camada limite do metal

duro. Sendo assim, pode-se estabelecer que o controle de pH proposto variando entre 6,5 a 7,5, condutividade máxima de 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e minimizando o tempo de contato da água com o metal duro, consegue-se reduzir a dissolução de Co para um valor de até 7 μm .

d) Constatou-se a importância da aplicação de melhores estratégias de usinagem fazendo com que as peças permaneçam o mínimo tempo submerso no dielétrico. E a necessidade de remoção das danificações no topo de punções de metal duro em profundidades de 6 a 14 μm . Constatou-se também que com o uso de água destilada como dielétrico, tem-se a diminuição das danificações na lateral usinada do metal duro, reduzindo de 12 μm para 4 μm de profundidade.

e) Com os experimentos relacionados à classe de metal duro, observou-se que o metal duro 2 (estipulado pela tabela de tecnologia da máquina) com composição de 85%WC+15%Co, apresentou fraca dissolução de Co no topo de 4 μm e microtrinca na lateral de 7 μm de profundidade com extensão de 26 μm paralela à superfície. O metal duro 3 com composição de 88%WC+12%Co apresentou menor danificação na lateral, com valor de 2 μm . Já o topo apresentou valores de 14 μm . O metal duro 4 com ligante de Ni não apresentou características de corrosão no topo. Entretanto, a lateral usinada sofreu danificações de 17 μm , mostrando a fragilidade deste tipo de metal duro para os parâmetros de descarga utilizados. Foram observadas também concentrações de Ni em sua estrutura que juntamente com os efeitos da descarga elétrica podem ter aumentado as danificações na lateral. O metal duro 5 com 88,5%WC+11%Co+0,5%Ni apresentou a menor média de danificações entre o topo e lateral usinada. Os valores encontrados foram de 7 μm e 3 μm respectivamente. Desta forma, pode-se estabelecer uma classe com bons resultados em termos de danificações geradas pelo processo de WEDM para continuidade dos experimentos.

f) No que tange ao fio, constatou-se a possibilidade da utilização do fio F2 de fabricação nacional para WEDM em metal duro com resultado de mesma taxa de corte V_w e exatidão geométrica S_m , conicidade e rugosidade R_a dentro do especificado pela tabela de tecnologia e tolerâncias macro geométricas requeridas. Entretanto são necessárias pesquisas de melhoria da trefilação do fio nacional avaliado. Este parâmetro de processo da WEDM, não mostrou influência na dissolução de Co e microtrincas na superfície do metal duro.

g) O experimento de avaliação dos regimes de usinagem mostrou ser um bom método de avaliação do processo de usinagem por WEDM. Para o primeiro regime (desbaste) foi encontrado uma zona termicamente afetada (ZTA) de 31 μm que foi sendo eliminada à medida que os regimes de acabamento foram sendo aplicados. Os resultados encontrados, de acordo com as referências pesquisadas, mostraram a necessidade desta estratégia de usinagem para diminuição das danificações geradas no metal duro pelo processo de WEDM. Foi constatado que após o 6º e último regime de acabamento, as danificações diminuíram para 4 μm de profundidade. Com a comparação entre os valores de sobremetal aplicados (ofs) e danificações encontradas, conclui-se que é possível a diminuição de uma etapa ou regime de usinagem sem grande efeito prejudicial à qualidade da superfície usinada do metal duro e com potencial de ganho igual a 12% na taxa de corte V_w .

h) Em geral, observou-se que a fabricação de peças de metal duro por WEDM, mesmo com as melhorias propostas, é um processo que agride a superfície usinada devido ao efeito térmico gerado pela descarga elétrica e reação química com o dielétrico. Constatou-se em todas as amostras de metal duro, danificações em forma de microtrincas e dissolução do seu ligante.

Os procedimentos aplicados, análises realizadas e resultados encontrados, apresentam uma contribuição para o desenvolvimento do processo de WEDM em metal duro em termos de rendimento e principalmente qualidade dos componentes fabricados a partir deste material. Esta última sendo obtida através de menores danificações na superfície usinada para o aumento da vida de matrizes e punções usados para um processo crítico, como o de estampagem de lâminas de motores elétricos.

7. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Os experimentos realizados no presente trabalho, permitiram identificar oportunidades para futuros desenvolvimentos, sejam em função dos resultados encontrados ou em função dos fenômenos ainda não plenamente compreendidos.

As sugestões para trabalhos futuros são:

- Avaliação do desgaste e quebras em punções e matrizes com as otimizações propostas;
- Pesquisas de pós-tratamentos para retirada das microtrincas e dissolução do ligante na superfície do metal duro, como exemplo a lapidação ultrasônica e polimento;
- Comparação dos resultados obtidos com outros métodos de análise da camada limite após o processo de WEDM em metal duro;
- Análise da qualidade da superfície usinada e custo benefício em outras classes de fios, como exemplo fios de cobre, cobre revestido com zinco e de tungstênio;
- Comparação da qualidade, rendimento e custo entre os processos de retificação e WEDM na fabricação de punções e matrizes de metal duro, como também a vida destes na estampagem;
- Estudo do processo de fabricação e novos materiais em outros componentes de desgaste em ferramentas de metal duro, como exemplo em colunas e guias de punções;
- Estudo do comportamento de quebras em componentes de metal duro a partir do nível de danificação após o processo de WEDM;
- Estudo do comportamento da resistência à fratura em diferentes classes de metais duros variando o nível de acabamento após o processo de WEDM.

REFERÊNCIAS

AGIE – CHARMILLES. **GF AgieCharmilles' products**. Disponível em: <<http://www.agiecharmilles.com.br/charmilles.html>>. Acesso em: 27 de julho 2007.

AGIE CHARMILLES GROUP. **Agiecut wire-cutting EDM systems (except Vertex): Service manual-S7 generators HSSC + IPG**. Switzerland: Georg Fischer Manufacturing Technology, 2004. 70 p.

AGIE-CUT. **Equipment manual: Wire cutting EDM systems Agie – Charmilles**. Switzerland: Agie Charmilles Group, 2003. 232 p.

AMORIM, F. L. **Tecnologia de eletroerosão por penetração da liga de alumínio AMP 8000 e da liga de cobre CuBe para ferramentas de moldagem de materiais plásticos**. 2002. 147f.. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

AMORIM, F. L.; WEINGAERTNER, W. L. Eletroerosão: Parâmetros do processo por penetração no acabamento de aço ferramenta. **Máquinas e metais**, São Paulo, n. 461, p. 30-47, jun. 2004.

AMORIM, F. L.; TEIXEIRA, C. Eletroerosão por fio de metal duro utilizado em ferramentas de estampagem. In: 3º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação-COBEF. **Anais...** Joinville: Tec Art Editora Ltda, 2005. p. 232-241.

ASM ENGINEERED MATERIALS REFERENCE BOOK. ASM International 1. ed. Michael Bauccio. Cleveland: ASM International, 1989. p. 178-191.

CERATIZIT. **Products and application**. Disponível em: <http://www.ceratizit.com/tool_die_blanks_ENG_HTML.htm>. Acesso em: 01 abril 2008.

CORRADA. **Produtos e Serviços**. Disponível em: <<http://www.corrada.it/por/pages/prodotti/pro000200.php>>. Acesso em: 22 julho 2007.

DIBITONGO, D. D. et al. **Theoretical models of electrical discharge machining process. A simple cathode erosion model**. Journal of Applied Physics, Texas, 1 nov. 1989. N° 9, p. 4095-4103.

ENGEMAQ. **Máquinas de eletroerosão. Manual de operação.** São Paulo: ENGEMAQ, [1986?]. 93 p.

EROMA EDM. **Materiais e acessórios para eletroerosão.** Disponível em: <<http://www.eroma.com.br/fiosbedra.htm>>. Acesso em: 11 dezembro 2007.

EUBANK, P. T. et al. **Theoretical models of electric discharge machining process. The variable mass, cylindrical plasma model.** Journal of Applied Physics, Texas, 1 jun. 1993. Nº 11, p. 7900-7909.

GRESKOVIC, F. et al. **The investigation of tool life in blanking of electric motor laminations.** In: The Third International Scientific Conference- Mechanics. Poland: Technical University, 2002. p. 81-84.

GURLAND, J.; BARDZIL, P. **Relation of strength composition and grain size of sintered WC-Co alloys.** USA: Trans Aime, vol. 57, 1955. p. 311-315.

HEGEMAN, J. B. et al. **Grinding of WC-Co hardmetals.** Groningen: Elsevier Science, 2000. 12 p.

HEUVELMAN, C. J. **Some aspects of the research on electrode-erosion machining.** Great Britain: Annals of CIRP. v. 17, 1969. p. 195-199.

HEUVELMAN, C. J. **Cooperative research on spark erosion machining of cemented carbides (die-sinking).** Eindhoven: CIRP Technical Reports, 1980. p. 541-544.

IPT INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Curso de Aços Elétricos. Estampagem. São Paulo, 1997. 87 p.

KANHG, C. H.; RAJURKAR, K. P. **Fundamental theories of parameters of EDM process.** USA: SME Technical papers, v 1, 1977. p. 77-285.

KLOCKE, F.; NÖTHE, T. **Tool manufacture by spark erosion: Influence of the material on the performance.** Aachen: Laboratory for Machine Tools and Production Engineering-RWTH, [1997?]. p. 1-10.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren – 3: abtragen und generieren.** In: AMORIM, F. L. **Tecnologia de eletroerosão por penetração da liga de alumínio AMP 8000 e da liga de cobre CuBe para ferramentas de moldagem de materiais plásticos.** Florianópolis: 2002. p. 22, 35, 36, 37-46.

KÖNIG, W. **Tecnologia de Fabricação: Remoção**. Tradução de Walter L. Weingaertner. Florianópolis: Editora VDI, 1990 (versão pré-gráfica).

LÄMMLE, J. The Most Important Properties When Using Hard Metal in Modern Press Tolling. **Hard Metal in Toll Maker Industry is a Question of Confidence**, Austria, 1 oct. 1995. Edição nº2, p. 4.

LÄMMLE, J. et al. WEDM of Hardmetal, the view of the Metallurgist. **Hard Metal in Toll Maker Industry is a Question of Confidence**. Austria, 1 may. 1997. Edição nº 3, p. 8.

LENEL, F. V. **Powder metallurgy: Principles and applications**. Metal Powder Industries Federation. Princeton, 1980, p 385.

LÖTTGEN, R. EDM die sinking: State of the art. In: International Symposium for Electromachining. Aachen: 1 v, 1998. p. 341-350.

MDC (MACHINING DATA CENTER). Machining Data Handbook – volume 2, 3. ed., 1980, seção 18. p. 98-108.

MAGGI, F. et al. Eletroerosão de corte de metais duros. **Agie funkenerosion Technologies**, Suécia, 11 dez. 1991.

MALVESTITI. **Stampi di precisione**. Disponível em: <http://www.malvestiti.com/it/default.html>>. Acesso em: 22 julho 2007.

MARCONDES, F. C. A história do metal duro. Disponível em: <www.usinagem-brasil.com.br>. Acesso em: 26 março 2007.

MATSUO, T.; OSHIMA, E. **Investigation on the optimum carbide content and machining condition for wire EDM of zirconium ceramics**. Japan: Annals of the CIRP. v. 41. 1992. p.231-234.

SANDVIK. **Hard materials**. Disponível em: <<http://www.hardmaterials.sandvik.com>>. Acesso em: 07 agosto 2007.

SCHUH, G. et al. Um estudo sobre o desafio da China no setor ferramenteiro alemão. **Ferramental**, Joinville, n. 10, p. 17-21. jan./dez. 2007.

SILVA, E. M. Influência dos parâmetros de usinagem na vida de ferramentas de metal duro. Máquinas e Metais, São Paulo, n.489, p. 42-53, out. 2006.

SOMMER et al. **Wire EDM Handbook**. 2.ed. Houston: Technical Advance Publishing Company, 1994. p.158.

VAN DIJCK, F. et al. Some results of physical research in EDM. In: International Symposium for Electromachining, Bratislava. **Proceedings...** 1v. [1974?]. p. 68-85.

YOSHIDA, S. **Influência dos processos de eletroerosão no rendimento de ferramentas: Problemas e soluções**, São Paulo: Engenharia de Ferramentas Brasimet, ago. 2002. 12p.